Luís Filipe de Almeida Teixeira
Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Desempenho Energético de um Edifício de Ensino

Modelação Gráfica, Simulação do Consumo e Estudo de Medidas de Eficiência Energética

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor Paulo José Carrilho de Sousa Gil, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira Brito Palma, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Filipe dos Santos Gomes
Arguente: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Fevereiro 2013

Desempenho Energético de um Edifício de Ensino – Modelação Gráfica, Simulação do Consumo e Estudo de Medidas de Eficiência Energética

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, todo o suporte que me deram durante o meu percurso académico, compreensão demonstrada e palavras de incentivo.

Este agradecimento estende-se à minha namorada, amigos mais chegados, colegas de curso e professores que, de certo modo, contribuíram para alargar os meus conhecimentos, em várias áreas.

Apesar de abordar um tema com o qual não estava familiarizado ao longo do curso, sinto que desenvolvi competências numa área complementar que considero extremamente interessante e desafiante nos dias que correm e cujo potencial de desenvolvimento e aplicabilidade é enorme, a curto e longo prazo.

Nesse sentido, exprimo um especial e sincero agradecimento ao meu orientador, Prof. Doutor Paulo Gil, que desde o início me encorajou a tomar este desafio, pela disponibilidade, transmissão de conhecimentos e pelas sugestões construtivas que me deu ao longo do trabalho, no sentido de enriquecer o seu conteúdo.

Agradeço ao meu co-orientador, Prof. Doutor Luís Palma, fundamental no suporte a este trabalho, pelo contributo, disponibilidade e interesse demonstrados.

Agradeço ao *staff* técnico e comercial da CRUZFER, nomeadamente ao Engº João Fernandes e ao Dr. Bráz Mendes, pela boa vontade demonstrada em contribuir para um trabalho académico, nem sempre bem aceite no âmbito comercial, e cuja colaboração se revelou uma mais-valia.

O meu agradecimento especial ao Prof. Doutor Eduardo Maldonado, pelo interesse e contributo que teve numa fase específica deste trabalho e cujas recomendações e referências se revelaram bastante úteis.

Resumo

A Eficiência Energética está diretamente relacionada com os sistemas usados no consumo de energia e com a forma como esses sistemas são utilizados e configurados. De facto, é um tema considerado de extrema importância a nível global e no contexto em que nos encontramos, assumindo especial relevância num período onde a palavra “crise” se aplica nas vertentes económica, social e ,mais do que nunca, ambiental. A segurança no abastecimento, as constantes crises do petróleo responsáveis pela volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e as altas emissões de Gases de Efeito de Estufa que potenciam o aquecimento global e a poluição ambiental são os principais motores para o desenvolvimento de novas soluções que permitam um consumo mais moderado e suportado, sempre que possível, por fontes de produção “limpas”. O alcance destas medidas abrange toda a cadeia de energia, incluindo a produção (oferta) mas focando-se sobretudo no consumo (procura), aplicando-se tanto ao universo dos imóveis como dos veículos móveis onde se destacam, como exemplo, os veículos elétricos ou movidos a etanol.

Neste trabalho, é feito um enquadramento inicial no que respeita ao consumo no sector doméstico em Portugal, bem como as práticas recomendadas para a construção de edifícios energeticamente eficientes, tanto a nível nacional como Europeu através de uma estratégia a médio e longo prazo para aqueles que serão os Edifícios do futuro, “*Edifícios energia quase zero*”.

A componente prática do projeto assenta na modelação em Google SketchUp® e simulação energética em EnergyPlus® de um edifício de ensino que se pretende caracterizar energeticamente de acordo com as condições originais de projeto e com base no Índice de Eficiência Energética definido no Regulamento dos Serviços Energéticos e Climatização de Edifícios, estudando-se e propondo-se a posteriori medidas alternativas que possam contribuir para o aumento da sua eficiência energética, envolvendo substituição/instalação direta de sistemas ou remodelações/melhorias de desenho nos existentes, avaliando-se a sua exequibilidade dos pontos de vista técnico e económico. As características térmicas que derivam da construção do edifício e dos seus sistemas de condicionamento térmico (disposição solar, isolamento das envolventes, sistemas AVAC, etc) são discutidas ao longo da dissertação e confrontadas com as melhores práticas atuais no que respeita à construção e climatização dos novos edifícios.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Gases de Efeito de Estufa, *Edifícios energia quase zero*, Regulamento dos Serviços Energéticos e Climatização de Edifícios, AVAC

Abstract

Energy efficiency is not only related to the type of systems used for energy consumption but also to the way those systems are managed and configured, by users and designers, respectively. In fact, it consists on an extremely pertinent subject globally discussed, in a context where the word “crisis” is broadly applied to economical, social and environmental aspects.

Alongside with the security of supply, the frequent oil crises responsible for the fossil fuel costs oscillations and the progressive increase of Greenhouse Gas Emissions which contribute to the global warming and environmental pollution, are the main drivers for the development and implementation of alternative solutions, focused on the consumption optimization and supplied by “clean” sources whenever is possible. The scope of those measures has a wide range of application, all over the whole energy chain, including production (supply side) but mainly centered on the consumption (demand side), applying both to buildings and vehicles, where electrical and ethanol sources can be given as examples.

As an initial approach, a focus is made on what concerns to the energy consumption trends for the residential sector in Portugal, alongside with the best construction practices recommended for the national and European energy efficient buildings, highlighting the medium and long term strategies and guidelines for those which will be the buildings of the future, the *nZEBs*.

This project consists on the physical structure (Google SketchUp ®) and HVAC (EnergyPlus ®) modeling and simulation of an educational building based on its original technical project, with the aim of defining its efficiency performance according to the regulation terms (RSECE). Moreover, alternative solutions are studied and proposed in order to improve the buildings’ performance, either by replacing/installing new systems or by executing technical upgrades on the existing ones, supported on technical and economical evaluations. The thermal properties of the building (solar distribution, envelope insulation, HVAC systems modeling), which reflect the construction and thermal conditioning strategies stated on the original project, are discussed and subject to a comparison with the current best practices taken on the construction and thermal conditioning guidelines for the upcoming buildings of the future.

Keywords: Energy Efficiency, Greenhouse Gas Emissions, nZEBs, RSECE, HVAC

Índice

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas

ADENE – Agência para a Energia

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BPIE – *Buildings Performance Institute Europe*

CAPEX – *Capital Expenditure*

CGD – Caixa Geral de Depósitos

COP – *Coefficient of Performance*

DOE US – *Department of Energy* (USA)

DGGE – Direcção-Geral de Energia e Geologia

EACI – *Executive Agency for Competitiveness and Innovation of the European Comission*

ENE – Estratégia Nacional para a Energia

GEE – Gases com Efeito de Estufa

IEA – *International Energy Agency*

INE – Instituto Nacional de Estatística

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

nZEB – Nearly Zero-Energy Building

OPEX – *Operational Expenditure*

PLR – *Part-to-Load Ratio*

PNAEE - Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PR – Período de Retorno do Investimento

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Serviços Energéticos e Climatização de Edifícios

SSAC – Sistema Solar de Ar Condicionado

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

UE - União Europeia

UE-27 – União Europeia (27 estados-membros)

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

UTAN – Unidade de Tratamento de Ar Novo

UPAR – Unidade Produtora de Água Refrigerada (correntemente designada *“chiller”)*

VE – Ventilador de Extração

VAC – Volume de Ar Constante

VAL – Valor Atual Líquido

VRV – Volume de Refrigerante Variável

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

ΔE - Variação de Energia (J)

$\dot{m}$ - Caudal mássico (m^3/s)

T - Temperatura (ºC)

ΔT – Variação da temperatura (ºC)

ΔW - Variação do trabalho (J)

ΔQ – Variação do calor (J)

$\dot{Q}$ – Capacidade térmica (W)

h - Entalpia do sistema (J)

H_{rel} – Humidade relativa (%)

T_{ref} – Temperatura usada como referência de projecto (ºC)

k – Condutividade térmica (W / $m^2.K$)

ρ – Densidade (kg/m^3)

c – Calor específico ($J/kg.K$)

P_{aq-} Potência térmica de aquecimento

P_{arr} –Potência térmica de arrefecimento

$P_{evap,max}$ - Potência máxima do chiller

ε_t – Eficiência térmica do equipamento (%)

PLR – Rácio do Fator de carga do equipamento

COP – Coeficiente de Performance do equipamento

A_p – Área útil do Edifício

$A_{colectores}$ – Área coberta pelos coletores solares térmicos

F_{CI} – Fator de correção do consumo de energia para aquecimento

F_{CV} – Fator de correção do consumo de energia para arrefecimento

F_{UP} - Fator de conversão de energia útil em energia primária

IEE – Indicador de Eficiência Energética

IEE_I - Indicador de eficiência energética de aquecimento

IEE_V - Indicador de eficiência energética de arrefecimento

Q_{aq} – Consumo de Energia em Aquecimento

Q_{arr} – Consumo de Energia em Arrefecimento

Q_{out} – Consumo de energia não relacionado com processos de aquecimento e arrefecimento

C_{elect} – Custo médio da eletricidade

$C_{O\&M}$ – Custos anuais de O&M

C_n – Custos anuais do projeto

B_n – Benefícios anuais do projeto

I_0 – Investimento inicial (ano 0)

i_n – Taxa de atualização anual (%)

i_{IPC} – Variação anual do IPC (%)

n – Tempo de vida útil do projeto (anos)

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A problemática energética é, atualmente, um tema bastante abordado, não apenas pelo cidadão comum mas, mais do que nunca, pelas instituições governamentais a nível mundial. As questões relacionadas com a Gestão da Energia tornaram-se não apenas num problema económico, mas principalmente num problema de sustentabilidade e segurança.

Apesar da severa crise económica e financeira que se verifica um pouco por todo o mundo, o consumo de energia aumentou 5% em 2010, ainda que aproximadamente 20% da população mundial continue sem acesso à eletricidade. Estima-se que de 2010 a 2035 a procura energética aumente um terço, impulsionada pelo aumento progressivo da população mundial e pelo crescimento anual médio da economia em 3,5% [26].

A segurança do abastecimento encontra-se ameaçada na medida em que os países da OCDE serão responsáveis apenas por 10% do crescimento da população mundial, 30% do aumento de produção económica e 10% da procura energética nas próximas duas décadas [26].

Efetivamente, o crescimento da população mundial e o avanço tecnológico e industrial observado nos países BRIC, especialmente China e Índia, estão a impulsionar o consumo mundial de energia, revelando-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam uma oferta mais variada, reduzindo as dependências registadas face aos países dominadores na produção de combustíveis fósseis.

Como forma de combater os elevados preços das fontes tradicionais de energia e promover a sustentabilidade ambiental, surgiram formas alternativas de produção energética, tais como a energia nuclear e as energias renováveis.

O combate à dependência dos combustíveis fósseis e à destruição ambiental maciça pode ser realizado de duas formas possíveis, onde a primeira passa essencialmente por fazer variar a oferta energética, investindo-se em tecnologias que permitam um aproveitamento rentável dos recursos endógenos (energia solar, hídrica, eólica) e a segunda assenta sobretudo numa gestão otimizada no que respeita ao consumo energético.

É nessa segunda vertente que assenta o princípio de eficiência energética. As medidas de eficiência energética a aplicar em edifícios devem servir para reduzir o consumo dos mesmos, visando poupanças significativas ao nível da fatura energética, sem no entanto penalizar o conforto dos seus ocupantes. Essas medidas poderão passar pelo próprio comportamento dos utilizadores ou, sempre que possível, pela substituição dos equipamentos instalados por outros energeticamente mais eficientes e cujo investimento seja economicamente viável.

A eficiência energética é um conceito que está hoje em dia disseminado e cuja aplicação e maturidade varia de país para país, cultura para cultura, mas cujo consenso é indiscutível a nível mundial. Conceptualmente, a Agência Internacional de Energia define eficiência energética como "um modo de gerir e restringir o aumento do consumo energético", defendendo que a sua aplicação funciona como "*uma ferramenta poderosa e económica para atingir um futuro energético sustentável, possibilitando reduções nos custos em infra-estruturas energéticas, reduções na tarifa de consumo, melhoria das condições de saúde pública, aumento da competitividade e aumento do bem-estar dos consumidores*" . Além destas mais-valias, permite também melhorias a nível ambiental através da redução dos níveis de emissão de GEE e poluição ambiental e a nível da segurança no abastecimento, através da disponibilidade ininterrupta das fontes energéticas a preços acessíveis.

Na Europa, o consumo de energia em edifícios representa 40% do consumo global e é responsável por 36% das emissões de CO_2 . A mitigação dessas emissões torna-se fundamental e o potencial de redução de custos de operação e manutenção ao longo da vida útil do edifício pode ascender a 80%, caso sejam respeitados os princípios de desenho estabelecidos na fase de projeto e construção para aqueles que serão os edifícios de futuro altamente eficientes, ou *nearly Zero-Energy Buildings* [6]. As fontes renováveis são indissociáveis do conceito de eficiência energética, na medida em que o objetivo final da sustentabilidade energética não é apenas quantitativo, mas tem também em conta a qualidade/origem da energia, onde o aproveitamento dos recursos naturais e renováveis representa um papel fundamental a nível ambiental.

Existem hoje em dia soluções disponíveis no mercado, conforme se irá descrever adiante, que se enquadram nesta perspetiva da redução do consumo de uma forma sustentável. Porém, os custos elevados e a dispersão geográfica ainda não permitiram criar economias de escala ao nível desejável para atingir os objetivos delineados.

Na União Europeia, esses objetivos estão claramente definidos desde 2008, altura em que foram aprovadas medidas para todos os estados-membros, estipulando que até 2020 se verifique (i) uma redução de 20% nas emissões de GEE, (ii) uma participação ativa de fontes renováveis como unidades produtoras em 20% da energia consumida e (iii) um aumento da eficiência energética em 20%, i.e, redução no consumo final.

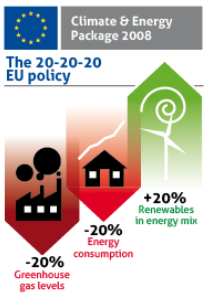


Figura 1.1 - Objetivo Europeu para 2020 *"UE 20-20-20".*

Mais recentemente, a última diretiva[1] lançada em 2010 veio reforçar as medidas "EU 20-20-20" traçadas para 2020 e alargar o seu horizonte temporal, incentivando a recuperação do parque edificado existente através de grandes intervenções de renovação nos edifícios de grande porte e, por outro lado, estabelecendo exigentes critérios de eficiência para a construção de edifícios energia quase zero, a serem implementados a partir de 2020.

Em Portugal, o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética estabeleceu em 2008[2] que, até 2015, deveriam ser lançados e postos em prática 12 programas de eficiência energética. Além desta medida, o plano estabeleceu como meta uma redução de 10% no consumo de energia final nos sectores do transporte, residencial e serviços, indústria e serviços do estado, até 2015.

Além do PNAEE, também em Portugal foi implementada, em 2010, a Estratégia Nacional para a Energia com objetivos traçados para 2020, nomeadamente através de ações de:

(i) Promoção da eficiência energética

(ii) Aposta nas energias renováveis e endógenas, estabelecendo-se uma contribuição mínima de 31% de origem renovável no *mix* global de consumo de energia final e de 60% no *mix* de energia elétrica, bem como uma redução de 20% no consumo de energia final.

Estas medidas foram o reajuste e a posta em prática, em Portugal, do modelo traçado pela União Europeia, com metas finais para a generalidade dos estados-membros, onde cada um deles se adaptou e estabeleceu as suas metas internas.

[1]UE-20-20-20, directiva 2010/31/EU de 19 de Maio 2010
[2] Resolução em Conselho de Ministros nº80/2008

No caso de Portugal, as metas estabelecidas nos seus programas são mais exigentes do que a Europeia, nomeadamente no que respeita ao desenvolvimento de energias renováveis, o que em parte se deve ao facto de ser dos países com maior maturidade nesse campo.

1.2 Objetivos

No âmbito do que foi descrito anteriormente, este trabalho assenta no estudo do desempenho energético do *Edifício X,* o edifício do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da FCT-UNL.

Numa primeira fase, procede-se à modelação gráfica do edifício, através da utilização de um software de *design* gráfico para o efeito (*Google SketchUp*). Nesta fase pretende-se tornar o modelo gráfico dotado de propriedades térmicas, através da definição de zonas e respetivas condições fronteira/envolventes[3].

Numa fase posterior, pretende-se analisar o desempenho energético correspondente à situação atual do edifício com os equipamentos instalados de origem[4], através do cálculo do respetivo Índice de Eficiência Energética, pelos princípios do RSECE.

Assente no princípio da otimização energética, pretende-se estudar a viabilidade de possíveis alternativas a serem adotadas com o principal objetivo de permitir uma redução do consumo energético global do edifício, contabilizando os ganhos energéticos e o impacto económico dessas alternativas.

Em suma, os principais desafios desta dissertação são:

- Obter os consumos referentes à situação atual do edifício

- Estudar medidas de racionalização da energia que permitam uma redução da fatura energética sem, no entanto, reduzir os níveis de conforto dos ocupantes

- Promover o uso de energias renováveis face às alternativas fósseis e contribuir para a sustentabilidade ambiental, visando uma redução máxima das emissões de GEE

---

[3] Para o efeito foi utilizado o *plug-in* OpenStudio, um software especialmente concebido para a integração *SketchUp – EnergyPlus,* desenvolvido e progressivamente atualizado por membros representantes do Departamento de Energia Norte Americano (US-DOE).

[4] Estabelecidos no documento do Projecto de Execução do Edifício

2. Conceitos e Tecnologias

2.1 Simulação Energética – *EnergyPlus* ®

A ferramenta utilizada para a simulação energética do edifício em estudo foi criada e desenvolvido nos EUA e a sua origem tem como referência dois programas (DOE-2 e BLAST) criados no final da década de 70 e bastante utilizados em toda a década de 80. O desenvolvimento destas ferramentas surgiu como resposta à crise energética mundial que se verificou ao longo da década de 70 e visou a emergente necessidade em se desenvolverem comportamentos que conduzissem a poupanças significativas de energia, principalmente no interior de grandes edifícios.

O *EnergyPlus* ® foi concebido para fazer análises e balanços térmicos em qualquer tipo de edifício e a sua utilização tem sido cada vez mais recorrente, tornando-se numa das plataformas de cálculo energético mais utilizados na atualidade, grande parte devido ao esforço investido no seu desenvolvimento, por parte de equipas especializadas que trabalham constantemente para o seu aperfeiçoamento. No que respeita às propriedades desta ferramenta, o *EnergyPlus* ® possibilita o cálculo de cargas térmicas de aquecimento e de arrefecimento, bem como cargas internas resultantes de iluminação, equipamentos elétricos ou sistemas de ventilação. Além disso, torna possível de uma forma simples a integração de vários sistemas que se relacionam fisicamente, como é o caso das unidades produtoras que alimentam as instalações de consumo/sistemas locais de climatização. Essa integração é feita através de uma série de equipamentos, interligados de uma forma sequencial e coerente.

Por outro lado, existe a capacidade de se calcularem as trocas de calor entre zonas adjacentes, envolventes internas e envolventes externas, permitindo determinar as quantidades térmicas transferidas a partir de uma determinada superfície para o interior de uma zona, ou dessa zona para o seu exterior. O cálculo de transferência de calor através das superfícies que envolvem uma determinada zona é baseado nos processos de condução, convecção e radiação. As condicionantes impostas pela transferência de calor, quer internas "*multi-zona"* quer externas representam um fator-chave para o dimensionamento da potência dos equipamentos de climatização.

A possibilidade de visualização dos resultados das simulações em diversos pontos dos sistemas, com amostras temporais bastante próximas (resolução máxima de 1 minuto) é outra mais-valia da ferramenta.

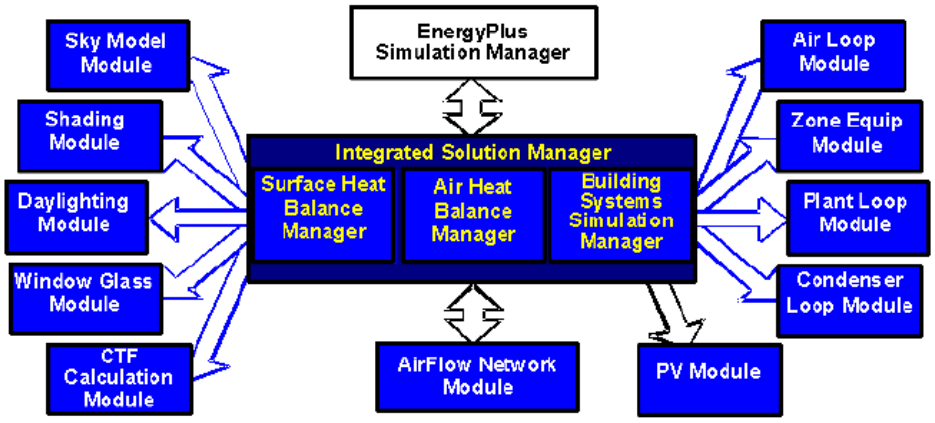


Figura 2.1 - Esquema de funcionamento e processamento do *EnergyPlus.*

Algumas das principais variáveis que a ferramenta permite registar são:

- Temperatura das superfícies e dos fluidos
- Caudal mássico e volúmico dos fluidos
- Humidade relativa das zonas
- Temperatura ambiente exterior e interior para as várias zonas
- Consumo energético e carga instantânea por período horário, a nível de zona ou de equipamento consumidor

O *EnergyPlus* é uma ferramenta fiável que, sempre que parametrizado de forma coerente, permite simulações bastante próximas da realidade devido ao nível de detalhe e capacidades de cálculo que apresenta.

2.2 Panorama Energético

Neste sub-capítulo serão descritos os principais indicadores no que respeita ao estado da arte da climatização em edifícios, tomando como referência o mercado norte-americano através de dados oficiais fornecidos pelo DOE e a situação nos países da União Europeia, através de estudos efetuados pela UE-27.

O consumo de energia em edifícios comerciais ou residenciais representa cerca de 40% do consumo energético global, tanto nos EUA como na Europa [18]. Um dos principais problemas que se coloca é a falta de sensibilidade por parte da população no que respeita à racionalização do consumo energético, existindo enormes taxas de desperdício. Além disso, o crescente número de aplicações tecnológicas que tem surgido no curto-prazo em todas as indústrias aumentou exponencialmente a quantidade de fins de utilização (*"end uses")* da

energia o que torna ainda mais difícil estimar as necessidades de consumo e saber onde atuar para as reduzir.

Por outro lado, grande parte dos edifícios existentes foram construídos durante ou anteriormente à década de 80 e a sua estrutura não se enquadra com as novas tecnologias existentes, concebidas para edifícios energeticamente eficientes, exigindo com isso reformulações de grande porte que acabam por ser inviáveis do ponto de vista técnico ou económico. Este é um problema estritamente relacionado com o lado da procura, uma vez que hoje em dia estão perfeitamente identificadas todas as formas de produção de energia e o seu potencial de exploração.

2.2.1 Panorama Europeu

O consumo em edifícios na Europa ascende a cerca de 40% do consumo global de energia.

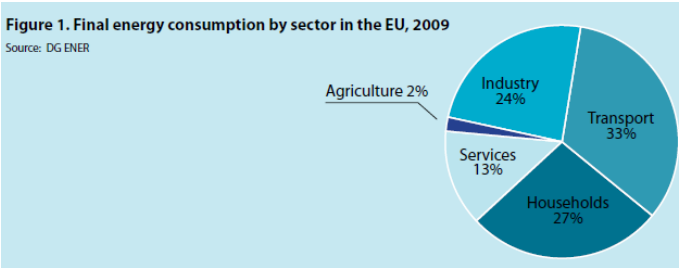


Figura 2.2 - Consumo de Energia Final na UE por Sector de atividade [6].

Igualmente, as emissões de gases com efeito de estufa representam cerca de 36% do total de emissões.Em termos de emissões equivalentes de CO_2, Portugal apresenta um dos índices mais baixos da zona UE-27, com valores médios inferiores a 40 kg/m^2, um valor cerca de 30% abaixo da média da UE-27 que se situa nos 54kg/m^2, conforme se pode observar na **Figura 2.3**.

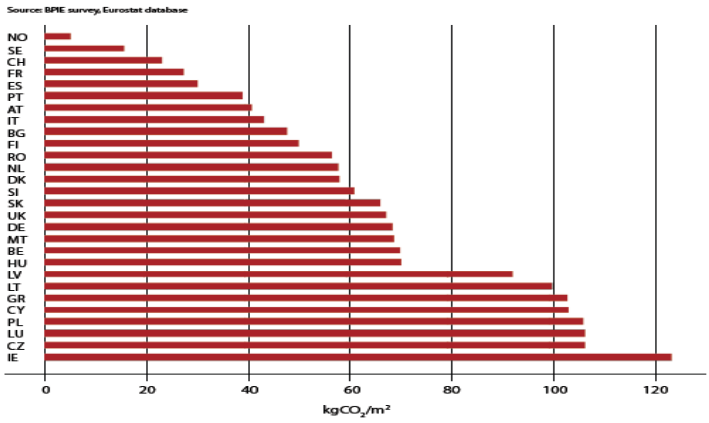


Figura 2.3 - Emissões de CO2 por País da EU. [6].

O nível de emissões de CO_2 está relacionado de forma direta com o tipo de fontes de produção que constituem o *mix* energético de um determinado país, essencialmente pela parte do consumo que deriva da eletricidade. Assim, países como a Noruega e a França, Espanha ou Portugal apresentam baixos índices de emissões de CO_2 no consumo em edifícios, o que não implica que a eficiência energética dos mesmos seja superior. No caso concreto, o peso da produção nuclear em França, a grande capacidade hídrica da Noruega e o *mix* variado de renováveis em Espanha e Portugal são responsáveis por esses níveis mais reduzidos.

Um estudo efetuado e publicado em 2011 [6] revelou que, na UE-27, 50% do espaço ocupado por edifícios está situado nos países de Europa do Norte e Oeste, sendo que nos países do Sul da Europa nos quais está incluído Portugal, representa 36% e nos países do Leste apenas 14%, conforme mostra a **Figura 2.4**.

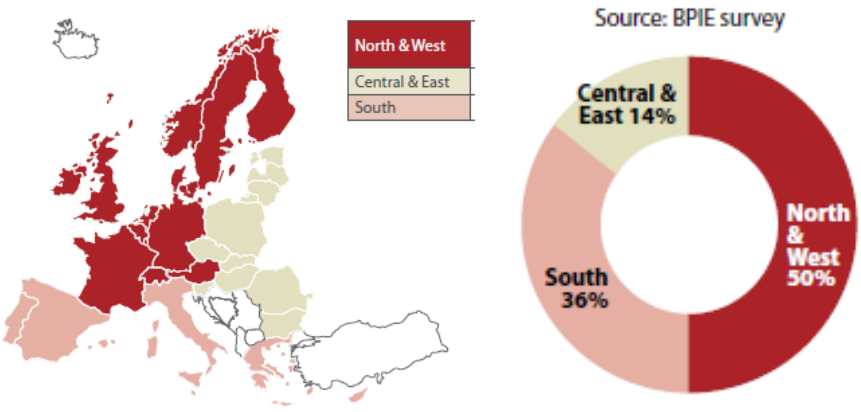


Figura 2.4 – Distribuição geográfica dos Edifícios por zona da UE-27 [6].

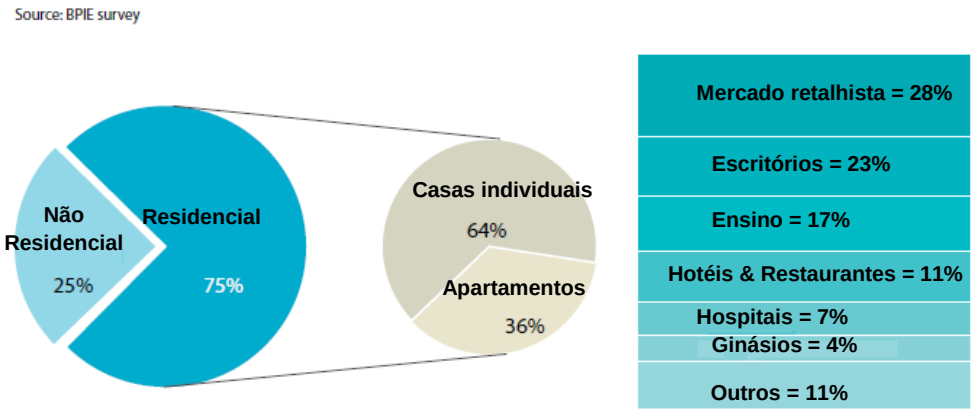


Figura 2.5 - Distribuição dos Edifícios por tipo de atividade [6].

Tipicamente, grande parte dos edifícios atuais na Europa foram construídos antes da década de 60 (cerca de 40%), principalmente nos países da Europa Central e de Leste. Comparativamente aos anos anteriores, as décadas de 90 e de 2000-2010 viram uma taxa mais reduzida na construção de novos edifícios, sendo que o incremento durante os últimos vinte anos representa menos de 20% do total de edifícios, em qualquer das 3 zonas Europeias [6].

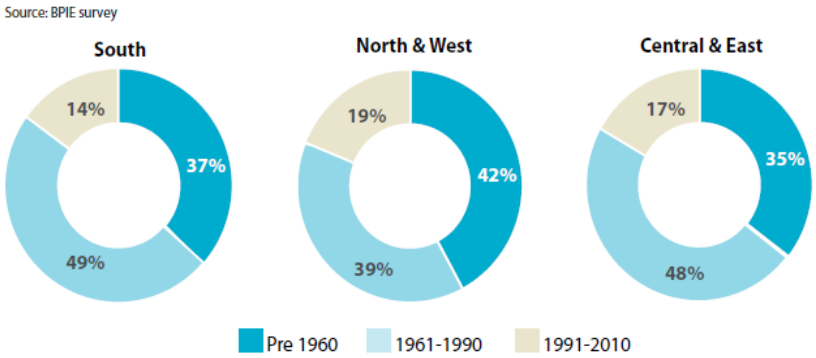


Figura 2.6 – Idade dos Edifícios existentes por zona geográfica [6].

Nos últimos 20 anos o consumo final de energia em edifícios aumentou cerca de 12,5% na UE-27, tendo-se registado um aumento da eletricidade no *mix* total de 50% e um decréscimo dos combustíveis fósseis líquidos e sólidos em 27% e 75%, respetivamente [6] . Dentro dos tipos de edifícios, o sector residencial é responsável pela maioria do consumo energético, constituindo cerca de 68% do consumo global. Esse consumo provém essencialmente de aquecimento e arrefecimento de espaços (ar condicionado), bem como aquecimento de águas para uso doméstico. No entanto, a tendência demonstra que a eletricidade tem um peso cada vez maior devido ao número de aplicações elétricas que vão aparecendo do mercado.

Por sua vez, os consumos relativos a aquecimento e arrefecimento de espaços acompanham o ano climático sendo tanto maiores quanto maior for o desvio em relação às temperaturas médias sazonais.

Em relação às fontes utilizadas no *mix* de energia dos edifícios residenciais, a integração de produção renovável está ainda pouco amadurecida, representando cerca de 12% nos países do Sul da Europa, 9% nos países do Norte e Oeste da Europa e 21% nos países da Europa central e de Leste. De acordo com a **Figura 2.7**, os países da Europa central de Leste são também os que têm uma maior integração de produção descentralizada de calor, seguidos pelos países do Norte e Oeste. O uso dos combustíveis sólidos é ainda muito recorrente nos países de Centro e Leste, com o exemplo típico da Polónia, onde o carvão representa 41% do consumo para aquecimento em edifícios residenciais.

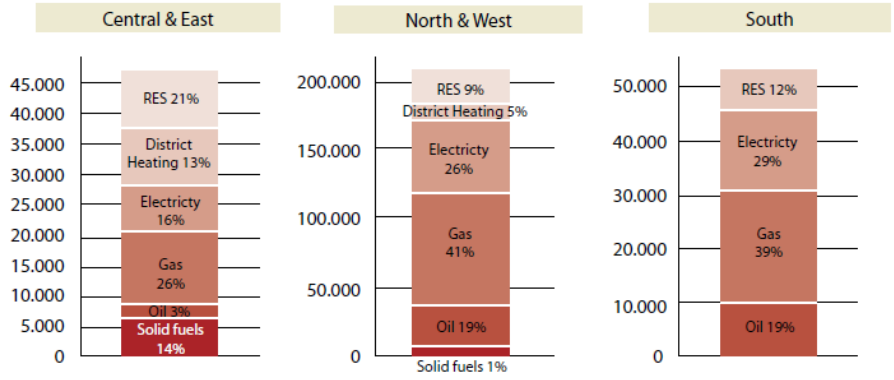


Figura 2.7 - Distribuição dos edifícios existentes por zona geográfica e tipo/fonte de consumo [6].

O desempenho energético dos edifícios está relacionado com múltiplos fatores, nomeadamente com o comportamento dos ocupantes (configuração das temperaturas de referência dos espaços, desligar equipamentos quando não são necessários), as características da envolvente, a eficiência dos sistemas de aquecimento e arrefecimento.

Apesar de existirem atualmente soluções que permitem um bom desempenho energético em novos edifícios, tanto do ponto de vista da construção (bons isolamentos, orientação solar,etc) como ao nível do consumo de equipamentos, o grande desafio passa por integrá-las nos edifícios existentes, onde o potencial de ganhos pode ser maior.

Relativamente às características do isolamento térmico das envolventes, alguns países da UE-27 utilizam valores de coeficientes de transferência de calor a cumprir de há vários anos a esta parte, como é o caso de Portugal, através dos valores impostos pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Os países mais exigentes a nível de isolamento térmico de envolventes são os do Norte da Europa, compreensivelmente devido ao seu clima frio, conforme se pode constatar através da **Figura 2.8**. Nos últimos 5 anos, os valores de coeficientes de transferência de calor em Portugal reduziram-se em 50% nos novos edifícios construídos (sector residencial).

	MT	CY	PT	EL	ES	IT	LV (1)	FR	BG	BE	NL	IE	HU	SI
HDD(1)	560	782	1282	1663	1842	1907	1970	2483	2686	2872	2902	2906	2922	3053
Roof	0.59	0.85	0.9-1.25	0.35-0.5	0.45-0.65	0.32-0.65	0.2k-0.35k	0.2-0.25	0.3	0.3	0.4	0.25	0.25	0.2
Walls	1.57	0.85	1.45-1.8	0.4-0.6	0.57-0.94	0.33-0.62	0.25k-0.5k	0.36-0.40	0.35	0.4	0.4	0.37	0.45	0.28
Floor	1.57	2		0.45-0.5	0.62-0.69	0.29-0.38	0.2k-0.35k	0.37-0.40	0.5	0.6	0.4	0.37	0.45	0.9
Window/ Door	5.8	3.8		2.6-3.2	3.1-5.7	1.3-3.7	1.8k-2.4k	1.7-1.9	1.8	2.5	4.2	2.2	1.6	1.1 -1.6

	UK(1)	RO	DE	SK	CH(2)	DK	CZ	AT	PL	LT	EE	SE(4)	NO	FI
HDD	3115	3129	3239	3453	3482	3503	3571	3573	3616	4094	4444	5444	5646	5850
Roof	0.2	0.2	0.24	0.19	0.17 or 0.2	0.2	0.24	0.2	0.25	0.16	0.15-0.2	0.4-0.6	0.18	0.09
Walls	0.3	0.56	0.24	0.32	0.17 or 0.2	0.3	0.3	0.35	0.3	0.2	0.2-0.25		0.22	0.17
Floor	0.25	0.35	0.3		0.17 or 0.2	0.2	0.45	0.4	0.45	0.25	0.15-0.2		0.18	0.16
Window/ Door	2	1.3		1.7	1.3	1.8	1.7	1.4	1.7	1.6	0.7-1.4		1.6	1.0

Figura 2.8 - Valores máximos para o coeficiente de condutividade térmica U nos vários países da UE em função dos dias de aquecimento (HDD entre 1980 e 2004) [6].

Outro problema bastante recorrente na construção dos edifícios diz respeito aos desnivelamentos e frinchas existentes entre diferentes componentes da envolvente, nomeadamente entradas de ar nos espaços entre calhas das janelas e paredes exteriores. Na prática, isso reflete-se ao nível da má qualidade do ar uma vez que o ar circula descontroladamente (sem pré-tratamento ao nível de temperatura e/ou velocidade) e consequentemente pode provocar maiores níveis de desconforto, podendo exigir maiores necessidades de aquecimento/arrefecimento. No sector não residencial, onde se insere o edifício em estudo, o aumento do consumo de eletricidade nos países da UE-27 tem sido linear ao longo dos últimos 20 anos e ascende a 74%. Pelo contrário, o consumo de combustíveis fósseis tem-se mantido mais ou menos constante.

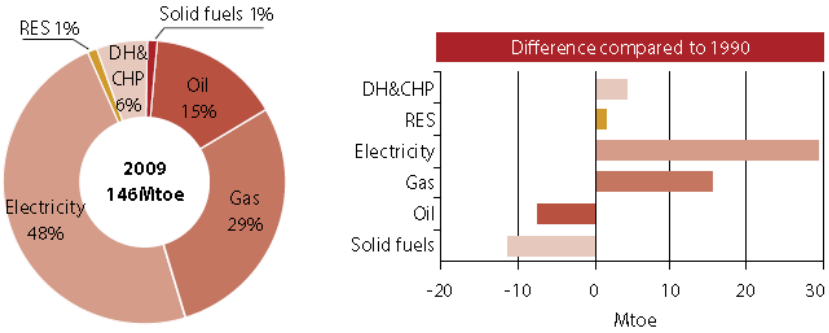


Figura 2.9 - Distribuição por tipo de consumo em edifícios do sector não residencial [6].

A **Figura 2.9** mostra que grande parte do consumo energético dos edifícios não residenciais é fornecido por eletricidade, seguido pelo gás, fuel, produção descentralizada de calor e unidades de cogeração e finalmente, fontes renováveis e combustíveis sólidos, essencialmente o carvão. Os factos comprovam que a integração de fontes de produção renovável nos edifícios não residenciais possui ainda um potencial enorme, tanto para os novos edifícios como para os existentes.

O consumo global equivalente em edifícios não residenciais é cerca de 40% superior ao consumo equivalente em edifícios residenciais. De acordo com a **Figura 2.10**, desses 40% a maior fatia reparte-se por edifícios de escritórios e mercado de retalho, que representam também a maioria dos edifícios não residenciais na UE-27.

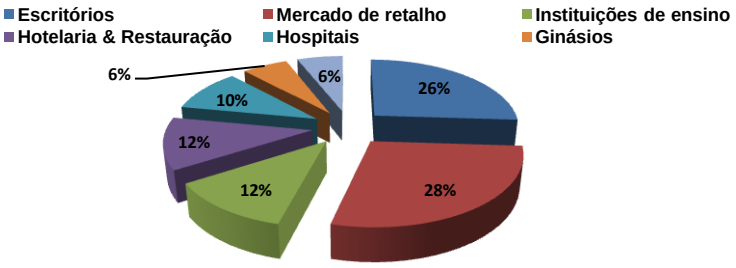
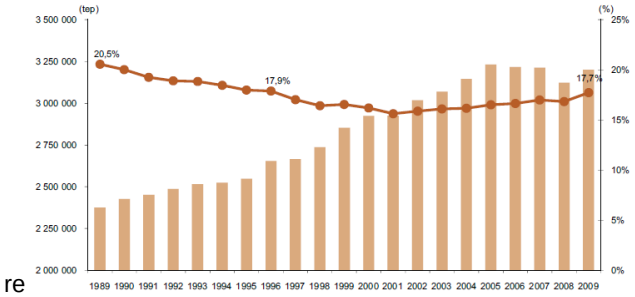


Figura 2.10 - Repartição do consumo energético por tipo de atividade em edifícios não residenciais na EU-27 [6].

2.2.2 Panorama Nacional

2.2.2.1 Evolução do consumo energético em Portugal

A abordagem exaustiva mais recente ao contexto energético em Portugal foi realizada no final de 2010, envolvendo a colaboração do INE num estudo realizado pela DGGE e cofinanciado pelo EUROSTAT (UE) [12]. Segundo esse estudo mesmo estudo o consumo total[5] em Portugal entre Outubro de 2009 e Setembro de 2010 foi estimado em 5,902 Milhões de *tep*, tendo-se registado pela primeira vez uma maior parcela no consumo relativo aos transportes individuais utilizados pelos consumidores (50,6%) comparativamente ao consumo nas suas próprias habitações (49,4%). A despesa total ascendeu a ≈ 7245,3 M€. O consumo e despesa equivalentes por residência foram de 1,5 tep e 1.843€[6], respetivamente.



re

Figura 2.11 - Evolução do consumo no sector doméstico em Portugal e peso relativo no consumo total [12].

De acordo com a **Figura 2.12**, em 2009 o sector dos serviços, no qual se incluem as instituições de ensino, foi responsável pelo consumo de 12% do total de energia final, atrás do sector doméstico onde essa marca atinge os 17,7%. O sector dos transportes lidera com o com maior peso no *mix* de consumo (37,5%), seguido de perto pelo sector da Indústria (30,5%).

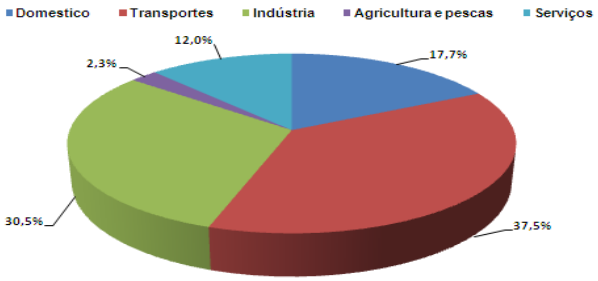


Figura 2.12 - Repartição do consumo de Energia Final por sector em 2009 [12].

[5] Energia final
[6] 840 € referentes ao consumo de energia na residência e 1002€ ao combustível utilizado nos veículos

2.2.2.2 Consumo Energético por fonte primária

Concretamente para o sector doméstico, existe um *mix* diversificado das várias fontes de energia primária, com ligeiras alterações no padrão de consumo ao longo dos últimos anos. A eletricidade lidera desde 2003, altura até à qual se recorria maioritariamente à lenha. O gás canalizado é a terceira maior fonte de consumo, representando as restantes fontes valores residuais no consumo total. Em 2009, a repartição do consumo destacava a eletricidade como líder (38,1%), seguida das lenhas[7] (36,3%), GPL (16,3%), gás natural (8,3%) e finalmente o Solar térmico (0,8%) e os produtos de petróleo e carvão (0,3%), conforme se vê na **Figura 2.13**.

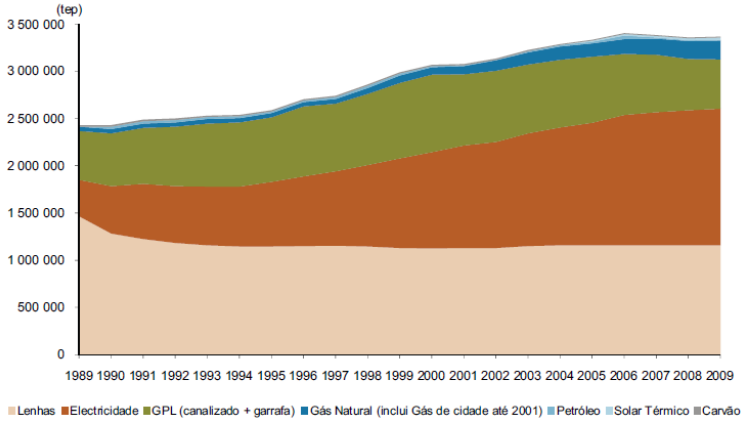


Figura 2.13 - Evolução do Consumo Energético por fonte primária [12].

De acordo com a **Figura 2.14**, em 2010 a tendência dos anos anteriores manteve-se, com a eletricidade a assumir um papel de ainda maior destaque relativamente à lenha e restantes fontes.

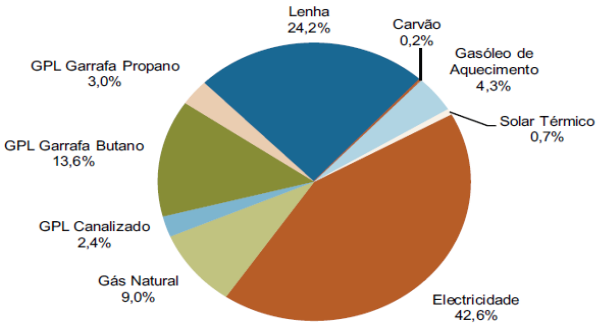


Figura 2.14 - Distribuição do consumo de energia por tipo de fonte,2010 [12].

[7] Biomassa e carvão vegetal

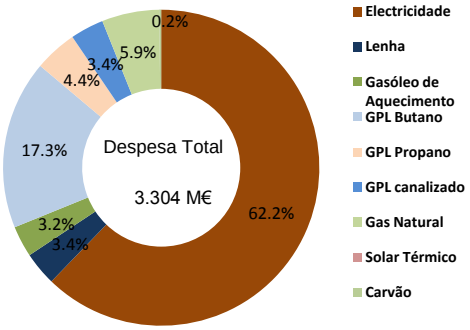


Figura 2.15 - Peso na despesa total do consumo doméstico (por tipo de fonte) [12].

A eletricidade é utilizada em 99,9% das residências (total de 14.442 GWh), o GPL em 56%, a lenha em 40% e o Gasóleo de aquecimento em 3,6%.

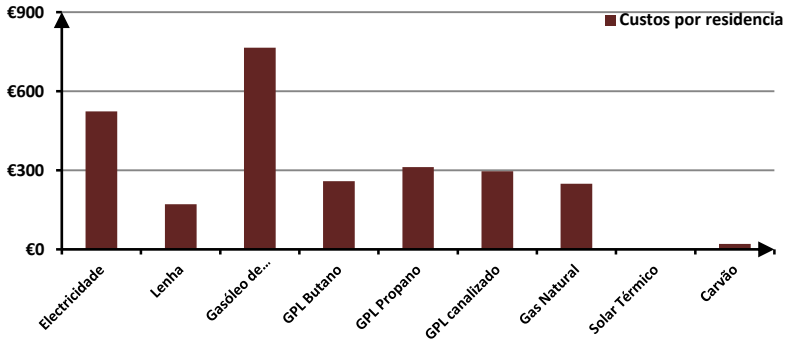


Figura 2.16 - Despesas médias anuais por residência e tipo de fonte [12]

2.2.2.3 Consumo Energético por Tipo de Uso

Outro dos indicadores-chave do consumo energético que permite identificar padrões e tendências é o tipo de utilização dada à energia consumida. Deste modo, é possível estabelecer relações diretas com o tipo de equipamentos sobre os quais atuar e focar as incidências com maior precisão relativamente às medidas de utilização racional que visem uma melhoria da eficiência energética.

Concretamente no sector doméstico em Portugal, foram analisados os consumos totais no que respeita a Aquecimento Ambiente, Arrefecimento Ambiente, Aquecimento de águas Sanitárias (AQS), Cozinha, Equipamento elétrico e Iluminação [12].

De acordo com a **Figura 2.17**, a maior parcela de consumo aplica-se à Cozinha, seguindo-se o Aquecimento de Águas, Aquecimento Ambiente, Equipamentos elétricos, Iluminação e, finalmente, o Arrefecimento Ambiente com um consumo bastante inferior aos restantes (0,5%).

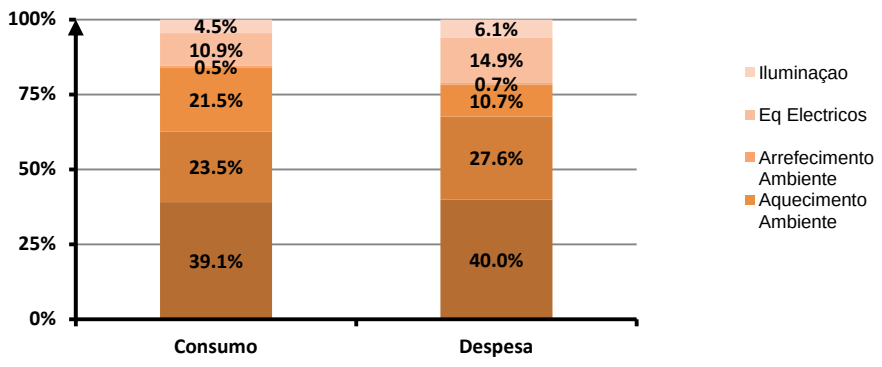


Figura 2.17 - Consumo e Despesas de Energia por tipo de utilização (sector doméstico) [12].

A eletricidade aparece como sendo a única fonte de energia comum a todos os tipos de consumo, refletindo a crescente importância que tem tido no balanço energético dos edifícios, no caso particular dos domésticos. onde existe um cada vez maior número de aplicações eléctricas/electrónicas em funcionamento.

De acordo com o mesmo estudo, a distribuição das várias fontes de energia relativamente ao tipo de uso é a seguinte:

1. Cerca de 75% do consumo de eletricidade é utilizado em **Equipamentos elétricos** e **Cozinhas.**
2. O Gás Natural, o GPL canalizado e o GPL engarrafado (Butano ou Propano) são utilizados maioritariamente para **Aquecimento de Águas** e em **Cozinhas.**
3. As principais aplicações da Lenha destinam-se a **Aquecimento ambiente** (52%) e a **Cozinhas** (42%).
4. Praticamente todo o consumo de Carvão (97%) é canalizado para as **Cozinhas**
5. O consumo de energia renovável nas habitações diz respeito às Lenhas, ao Carvão vegetal e ao Solar Térmico, representando 25% do consumo total e apenas 4% da despesa em matéria-prima.

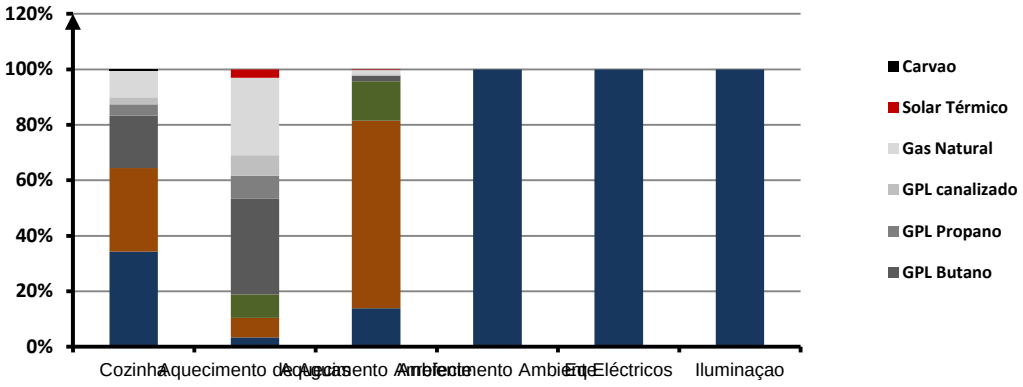


Figura 2.18 - Repartição das fontes de Energia por tipo de aplicação [12].

2.2.2.4 Consumo Energético por Equipamento

Ainda referenciando o mesmo estudo, para cada tipo de uso, foram analisadas as práticas recorrentes e atuais dos consumidores no que respeita aos tipos de equipamentos utilizados, a sua classe de eficiência e o seu fator de utilização.

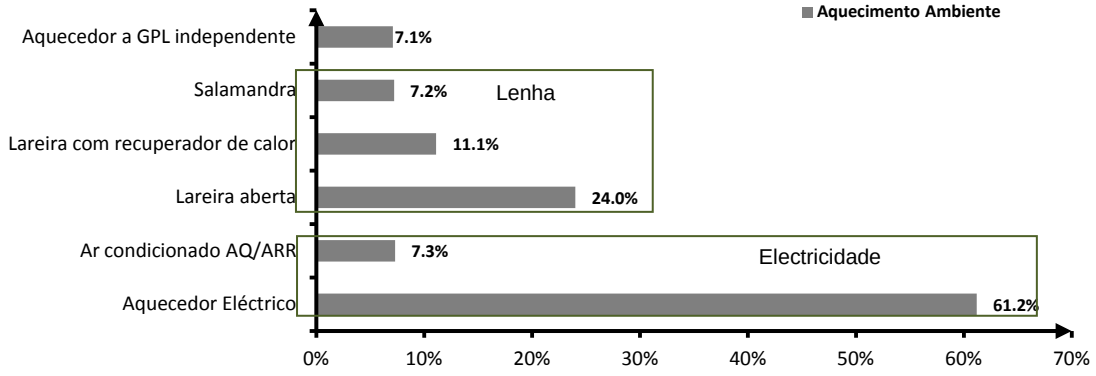


Figura 2.19 - Tipo de equipamentos utilizados para o Aquecimento ambiente [12].

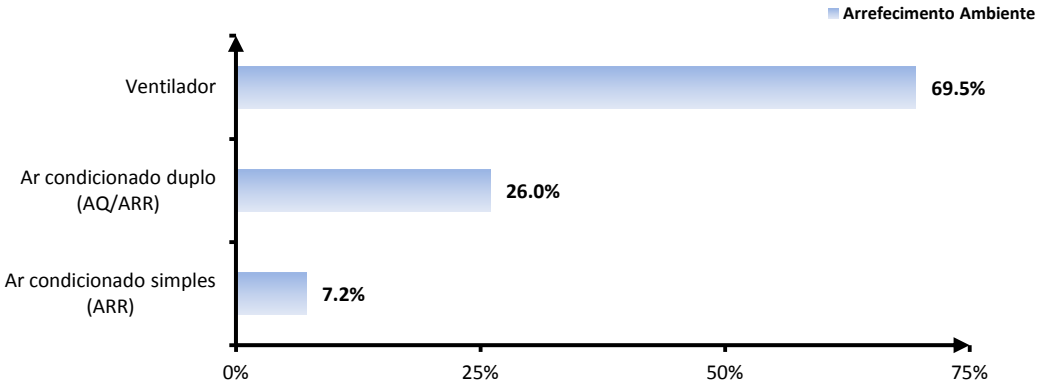


Figura 2.20 - Tipo de equipamentos utilizados para o Arrefecimento ambiente [12].

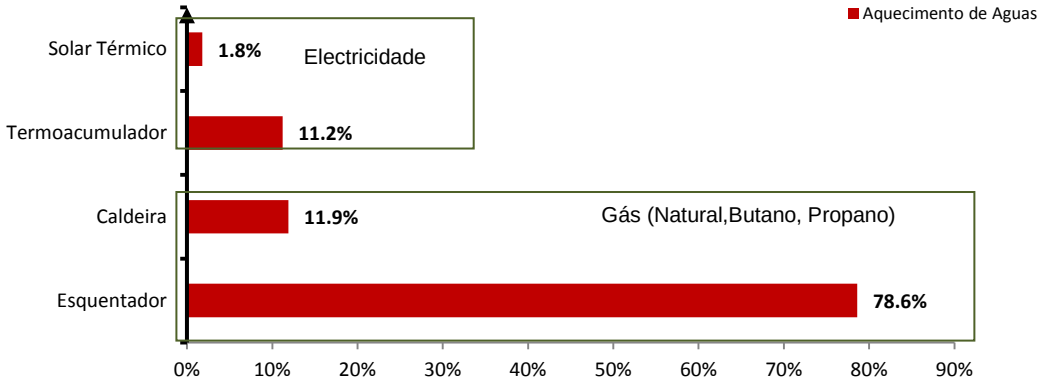


Figura 2.21 - Tipo de equipamentos utilizados para o Aquecimento de água [12].

2.2.3 Medidas de Eficiência Energética

Existem margens para melhoria e poupança energética em toda a cadeira de valor, envolvendo tanto a construção como a operação e manutenção dos edifícios ao longo da sua vida útil.

Em termos absolutos, as propriedades do edifício impostas na fase de construção são fundamentais uma vez que alterações futuras nesse âmbito têm um custo e um risco bastante superior. O tipo de equipamentos utilizados para climatização e consumo interno podem ser mais facilmente adaptáveis às necessidades temporais, uma vez que a substituição de equipamentos ou implementação de melhorias de desenho implicam à partida custos menores e uma maior flexibilidade de integração nas infraestruturas do edifício.

2.2.3.1 Edifícios em Portugal – Histórico na construção

Em primeiro lugar, a conceção do edifício deve ter em conta a proteção dos seus ocupantes e dos equipamentos no seu interior, devendo a sua estrutura ser enquadrada para assegurar esse objetivo de forma prioritária. No que respeita à sua envolvente, a existência de janelas ao longo das fachadas do edifício e a configuração das mesmas associada ao tipo de vidros permite reduzir as necessidades de aquecimento durante o Inverno e reduzir a carga de iluminação artificial. Por outro lado, o inconveniente de contribuir para o aumento das necessidades de arrefecimento durante os períodos de Verão devido ao aquecimento por radiação, particularmente em climas quentes, pode ser compensado por um bom sombreamento. Os principais problemas nas envolventes dos edifícios têm que ver com o mau isolamento das paredes exteriores e utilização de janelas de vidro simples, ganhos solares excessivos pela cobertura e vidros exteriores, bem como abertura de portas de acesso ao exterior durante longos períodos. Antes de partir para as recomendações no que respeita às "boas práticas" na conceção dos edifícios, convém analisar o panorama atual da construção em Portugal.

A idade dos edifícios tem influência no seu comportamento térmico e eficiência energética, tendo em conta que à partida as perdas energéticas pelas envolventes são maiores nas habitações mais antigas, onde as políticas de eficiência mais recentes não estão ainda contempladas. De acordo com a **Figura 2.22**, em Portugal mais de metade dos edifícios domésticos foram construídos antes de 1980, tendo portanto mais de 30 anos de idade. O sector da construção teve um crescimento maior na década de 90 (retomando os anos 70), tendo estagnado após 2000 [12]. Os novos edifícios domésticos nos quais as preocupações energéticas têm sido mais vincadas representam apenas 11% do total, significando que existe ainda uma enorme margem de melhoria no sector doméstico em Portugal, ainda que em

grande parte deles (os mais antigos) não seja possível aplicar medidas que não envolvam reformulação estrutural massiva e custos económicos avultados.

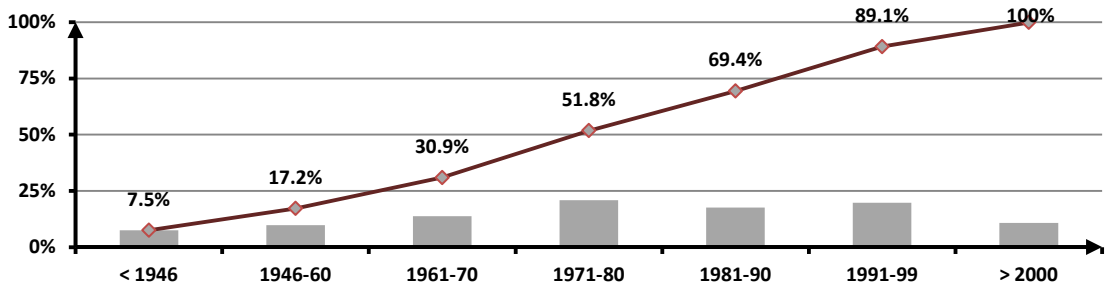


Figura 2.22 - Histórico de construção de Edifícios residenciais em Portugal [12].

Relativamente ao tipo de construção, estatísticas indicam que de uma forma geral a preocupação com o isolamento térmico representa ainda muito pouco no portfolio de edifícios domésticos. O recurso a vidros simples nas janelas é predominante de uma forma manifesta em todas as fachadas dos edifícios, registando-se em aproximadamente 75% dos casos. Os vidros duplos com corte térmico estão presentes em aproximadamente 6% dos casos.

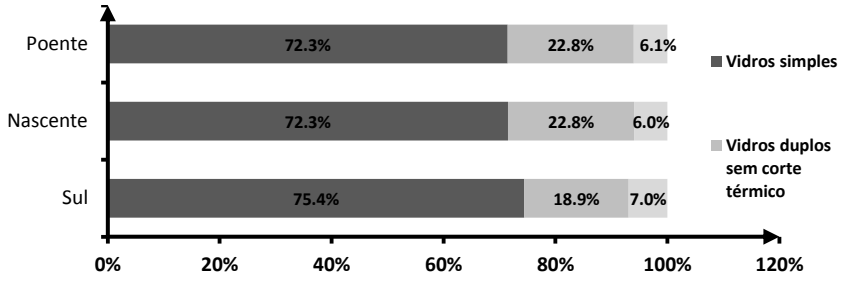


Figura 2.23 - Tipo de isolamento das janelas nas várias fachadas dos Edifícios [12].

De igual forma, o isolamento de fachadas exteriores e coberturas de edifícios (último andar ou em moradias) é incipiente, aplicando-se apenas a 21% e 17% dos casos, respetivamente.

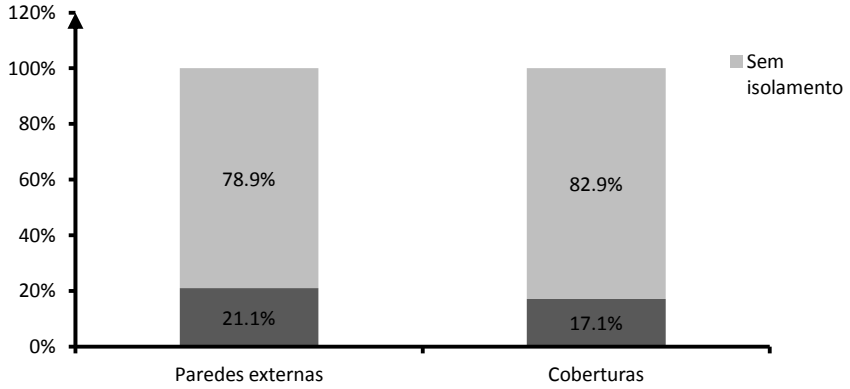


Figura 2.24 - Percentagem de edifícios com isolamento nas envolventes opacas [12].

2.2.3.2 Otimização do desempenho energético – Recomendações

Em Portugal continental o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios define claramente três zonas climatéricas distintas de Inverno, I_1, I_2, I_3 e de Verão, V_1, V_2, V_3 que diferenciam zonas geográficas com diferentes condições climatéricas para as duas estações sazonais. Dependendo da zona climática em questão, estratégias bioclimáticas devem ser traçadas e executadas na fase de construção e ciclo de vida . De uma forma geral, existem medidas comuns à generalidade das zonas.

Inverno:

- Isolar a envolvente dos edifícios (fachadas e janelas) tanto quanto a zona climática o exija (zona I_3 é a que se apresenta mais crítica)
- Evitar excessos de infiltrações de ar frio exterior
- Promover ganhos solares (vãos envidraçados estrategicamente orientados)

Verão:

- Restringir ganhos solares (soluções eficazes de sombreamento)
- Promover a ventilação natural sempre que a temperatura exterior o permita, recorrendo a técnicas de arrefecimento gratuito
- Adotar construções de inércia elevada de modo a estabilizar/manter condições de temperatura interior (bons isolamentos)
- Arrefecimento evaporativo nas zonas mais quentes e menos húmidas do interior
- Conceber edifícios com possibilidade de arrefecimento subterrâneo (pelo pavimento)

A adoção de sistemas passivos nos edifícios (aquecimento e arrefecimento) deve ser prevista na fase de construção, permitindo dotá-lo de características que serão fundamentais para a otimização energética ao longo do seu ciclo de vida, assegurando poupanças futuras a nível de climatização ou iluminação. Para o aquecimento passivo, são utilizados sistemas de ganho direto e indireto.

Sistemas de ganho direto

- Vãos envidraçados corretamente orientados (a Sul, Sudeste ou Sudoeste) e com uma área relativamente ampla para permitir o aquecimento por radiação solar

– Massas térmicas[8] projetadas de forma a permitir a absorção do calor durante o dia e a restituição desse calor durante a noite. Possuem efeito estabilizador da temperatura minimizando a amplitude térmica

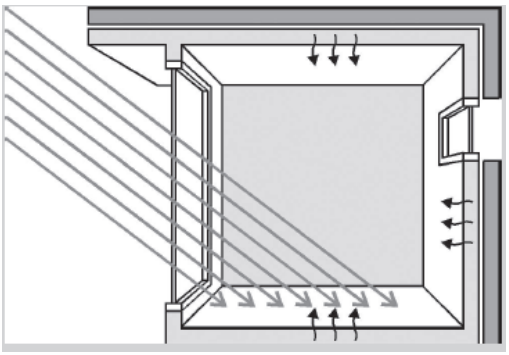


Figura 2.25 - Sistema Solar Passivo por ganho direto [21].

Sistemas de ganho indirecto

– Vãos envidraçados corretamente orientados com massas térmicas (parede) colocados entre si e o espaço a aquecer. Pode ser feita uma gestão da transferência de energia, adiando-se essa transferência para os períodos noturnos caso se pretenda ou promover o aquecimento instantâneo por via de ventilação natural.

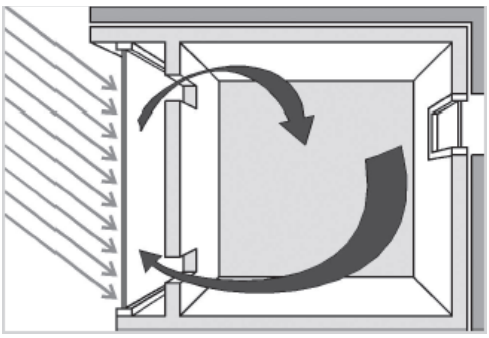


Figura 2.26 - Sistema Solar Passivo por ganho indireto [21].

Exemplos de sistemas passivos de ganho indireto são as (i) Paredes de Trombe e (ii) Paredes e colunas de água.

(i) *Parede de Trombe ou Armazenamento* – Parede interior maciça com espessura variável entre os 10cm e os 30cm, tipicamente pintada de cor escura para

[8] Materiais de construção com capacidade de armazenamento térmico (e.g paredes de betão ou de tijolo maciço).

aumentar a capacidade de captação e absorção solar. Podem ser usadas duas estratégias – aquecimento instantâneo através da abertura de orifícios na parede que permitam a troca de calor entre o espaço aquecido e o espaço interior via convecção natural (Parede de Trombe) ou, em alternativa, uma parede compacta onde o calor é armazenado e transferido por condução num processo mais moroso, sendo grande parte desse calor transferido no período nocturno (Parede de Armazenamento). As situações de sobreaquecimento neste tipo de sistemas deve ser evitada durante o período de Verão, através da instalação de mecanismos de sombreamento que anulem o seu efeito.

Figura 2.27 - Parede de Trombe (Casa Shaffer, Porto Santo) [21].

(ii) *Parede e colunas de água* – Processo de transferência de calor idêntico ao das paredes de armazenamento com a diferença de utilizar colunas de água envoltas em fibra de vidro como meio para a permuta de calor, que é feita por convecção e radiação.

Sistemas de ganho isolado

Possuem espaços independentes do espaço a aquecer (espaço estufa) e misturam as estratégias de ganhos directos com ganhos indirectos, podendo fazer a transferência de calor por via da condução (parede de armazenamento) e por via da convecção caso existam orifícios que permitem a circulação natural do ar.

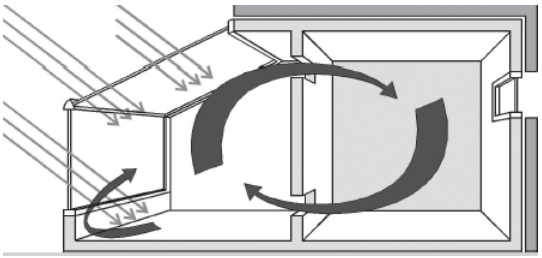


Figura 2.28 - Sistema Solar Passivo por ganho isolado [21].

Os sistemas de arrefecimento passivo têm como objetivo potenciar o conjunto de fontes frias que se verificam em determinado local, com vista a diminuir os ganhos de calor e a maximizar

a dissipação de calor dos espaços internos. A sua ação eficaz traduz-se numa diminuição significativa do fator de utilização dos sistemas de climatização convencionais para arrefecimento.O tipo de vidros utilizado e a existência de sombreamento são fundamentais, sendo o sombreamento exterior a melhor opção. No caso de não ser possível, a existência de vidros refletores associados a um sistema de sombreamento interior torna-se essencial. No que respeita à envolvente opaca, recomenda-se isolamento exterior especialmente nas coberturas dos edifícios, uma vez que são as que mais estão sujeitas à radiação solar durante o período de Verão. As envolventes pintadas a cores claras (especialmente branco) evitam ganhos de calor, uma vez que a sua absortividade reduz-se bastante.

Algumas estratégias para o arrefecimento passivo passam por recorrer-se a (i) Ventilação natural, (ii) Arrefecimento pelo solo, (iii) Arrefecimento evaporativo, (iv) Arrefecimento radiativo.

Ventilação natural

Especialmente aplicável em locais onde a amplitude térmica diária é elevada, potenciando o arrefecimento em períodos onde a temperatura exterior é inferior à temperatura interna. A ventilação cruzada/transversal é bastante eficaz e deve ser considerada durante a fase de conceção dos edifícios, permitindo um maior escoamento da massa de ar e, como tal, maior dissipação de calor. A ventilação unilateral dificulta o escoamento do ar e é tanto mais eficiente quanto maior forem as áreas e o número de aberturas.

Além de permitir o arrefecimento dos espaços, a ventilação natural possibilita o aumento do conforto térmico dos ocupantes, uma vez que o ar ventilado em contacto com os corpos provoca perdas de calor por evaporação.

Arrefecimento pelo solo

Tipicamente, as temperaturas que se registam ao nível do solo são inferiores às temperaturas ambiente dos espaços, pelo que aproveitar essa fonte fria como mecanismo de dissipação de calor é uma boa estratégia. A transferência de calor entre solo e espaço pode ser feita de forma directa ou indirecta. Na transferência direta o calor é dissipado por condução por toda a envolvente (cobertura, paredes e pavimento). Na transferência indireta, o espaço/zona do edifício está associado a um permutador ao nível do solo que consiste em condutas subterrâneas enterradas a uma determinada profundidade e por onde circula o ar a uma temperatura inferior. O desempenho deste tipo de sistemas, i.e a sua capacidade de dissipar calor e arrefecer os espaços depende da capacidade térmica das condutas de ar e pavimento, bem como da velocidade de escoamento e temperatura do ar circulante.

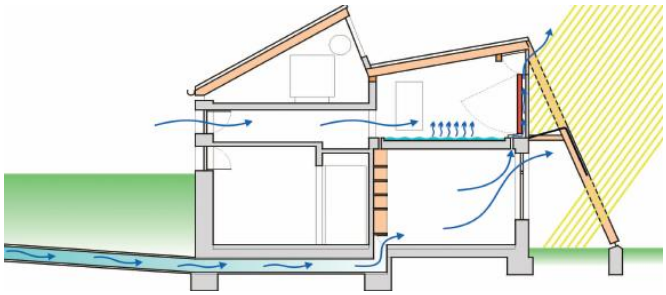


Figura 2.29 - Esquema de arrefecimento pelo solo [21].

Arrefecimento evaporativo

Este tipo de arrefecimento é pouco usual e necessita da existência de uma fonte de água na periferia do edifício (piscina, lago, fonte), junto às envolventes das zonas que se pretende arrefecer. O processo passa por uma diminuição da temperatura devido à evaporação da água, sendo o ar exterior arrefecido antes de entrar no edifício, ou seja, o ar quente que está em contacto com a envolvente exterior do edifício e sujeito à radiação solar.

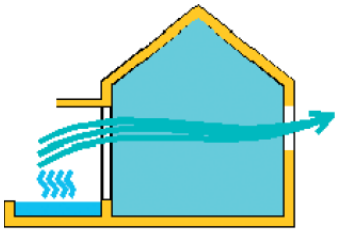


Figura 2.30 - Esquema de arrefecimento evaporativo [21].

Arrefecimento radiativo

Este tipo de arrefecimento tem uma aplicação bastante restrita e pode não ser de efeito prático caso não seja bem projetado, podendo trazer outras desvantagens. Concretamente, passa por dissipar o calor interno pela cobertura através do processo de radiação, sendo adequado fazê-lo durante o período noturno, quando não existe incidência de radiação solar.

No entanto, em climas onde o Inverno ou o Verão são rigorosos, é normalmente aplicado um isolamento nas coberturas que assim dificulta a dissipação do calor por radiação, tornando esta estratégia ineficaz por si só.

Como forma de contornar essa restrição, existem sistemas de isolamento móveis que permitem a sua ativação durante o dia e desativação durante o período noturno, possibilitando desse modo a minimização dos ganhos solares durante os dias quentes e a dissipação de calor durante a noite.

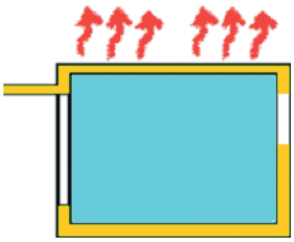


Figura 2.31 - Esquema de arrefecimento radiativo [21].

Bomba-de-calor reversível (aquecimento/arrefecimento)

Neste tipo de sistemas, as maiores poupanças podem resultar no combate às más práticas recorrentes que passam nomeadamente por (i) climatização de espaços que não são utilizados, (ii) utilização de sistemas locais/distribuídos dedicados para cada zona a climatizar ao invés de sistemas centralizados, (iii) reduzida aplicação de sistemas de aquecimento com recuperação de calor e (iv) instalação de unidades em zonas pouco aconselháveis por existir intensa troca de calor com o exterior (junto às envolventes externas).

2.2.3.3 Iluminação

A iluminação elétrica artificial representa cerca de 19% do consumo elétrico mundial e 7% do total das emissões de CO_2 [22]. Nos países em fase de industrialização esse consumo oscila entre os 5 e 15%, podendo nos países mais desenvolvidos representar mais de 80% do consumo global de eletricidade, sendo portanto um campo onde se justifica a aplicação de medidas que melhorem o desempenho dos sistemas em operação.

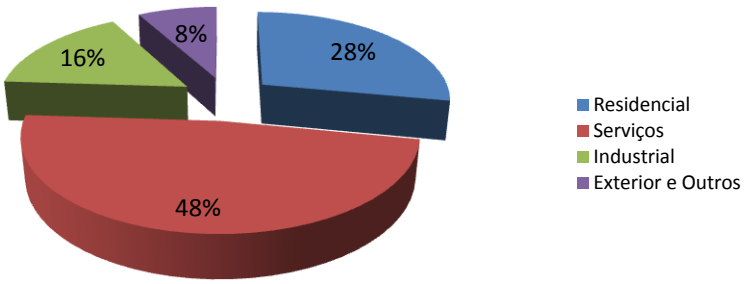


Figura 2.32 - Repartição do consumo em Iluminação por sector [22].

Atualmente, cerca de 70% da Iluminação é feita à base de sistemas de baixa eficiência, carecendo de sistemas de controlo, sensores e fontes eficientes de iluminação (lâmpadas). A idade dos edifícios e a reduzida taxa de melhorias são as principais causas dessa realidade.

Contrariando essa tendência, os objetivos estabelecidos para o curto-prazo visam a integração de sistemas de iluminação muito eficientes com outros sistemas em edifícios, tendo sido lançados os seguintes desafios por parte da Agência Internacional de Energia:

(i) Aumento da eficiência das lâmpadas;
(ii) Diminuir o impacto ambiental através da redução de emissões;
(iii) Baixar os custos com o equipamento;
(iv) Melhorar a qualidade da luz;
(v) Aumentar o ciclo de vida das lâmpadas;
(vi) Implementar sistemas de controlo/ajuste de iluminação artificial

Tecnologia existente/Tecnologia futura	Lâmpada fluorescente compacta	LED	Lâmpada de sódio	Balastro electrónico
Lâmpada incandescente	X	X		
Lâmpada de mercúrio		X	X	
Balastro ferromagnético				X

Figura 2.33 – Recomendações de Operação&Manutenção em Sistemas de Iluminação [22].

Os sistemas de ajuste de luminosidade (*dimming*) são cada vez mais uma solução credível, possibilitando ajustes manuais ou automáticos, quer em função da ocupação, quer em função da luz natural. A área do controlo na iluminação tem sido objeto de estudos de I&D nos EUA nas últimas décadas, existindo hoje em dia bastante informação no que respeita ao *know-how* deste tipo de aplicações, bem como resultados relativos às poupanças inerentes ao seu uso que efetivamente são conseguidas.

Diversos conceitos para o controlo de iluminação podem ser aplicados, nomeadamente:

(i) Horários – Ajuste dos níveis de luminosidade de acordo com a hora do dia e período do ano/mês/semana, programável pelo utilizador. Podem existir comutações *On/Off* ou de ajuste progressivo;
(ii) Ocupação – Ajuste dos níveis de luminosidade de acordo com a presença de ocupantes no respetivo espaço (detetores de ocupação baseados em radio-frequência);

Figura 2.34 - Detetor de ocupação [10].

(iii) Luminosidade natural (*daylighting*) – Ajuste dos níveis de luminosidade artificial de forma automática como resposta à presença instantânea de luz natural nos espaços (foto-sensores)

Figura 2.35 – Foto-sensor [10].

(iv) Controlo personalizado – Ajuste manual e individual dos níveis de luminosidade de acordo com as preferências do(s) ocupante(s) do espaço

(v) Balastros digitais - Permitem ajustar os níveis de iluminação por zona ou edifício, realizando esse ajuste através da interpretação dos sinais digitais com informação proveniente dos sensores de ocupação, luminosidade natural, ou horários. Possibilitam a reconfiguração para outras zonas com diferentes necessidades sem mudanças na instalação.

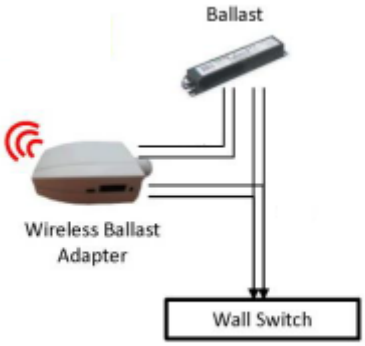


Figura 2.36 - Modo de atuação do balastro digital para ajuste automático da luminosidade [10].

As estratégias a aplicar no controlo da iluminação podem permitir poupanças até 60%, através da utilização separada ou conjunta das várias tecnologias e métodos atrás mencionados [10]. Essa aplicação deverá ter em conta fatores como a orientação do edifício (acesso a luz natural), tipo de utilização (níveis de ocupação), dimensão dos espaços/edifício a controlar (sistema de controlo centralizado com ajuste de fluxo luminoso individual), comportamento dos utilizadores (controlo personalizado) e orçamento disponível. Assim, existem estratégias que assentam em sistemas mais simples e baratos e outras que potenciam as mais-valias da tecnologia atual.

Como exemplo de um sistema robusto e avançado no controlo da luminosidade, pode-se refereir um sistema *wireless full dimming* que integre ajuste de luminosidade baseado em sensores de intensidade, qualidade da luz, ocupação, com balastros digitais ajustáveis, sendo

a comunicação entre as várias células, o módulo de controlo central e os balastros individuais feita via *wireless* [10].

Em geral, os sistemas de controlo de fluxo luminoso podem ser aplicados a uma grande variedade de lâmpadas, sendo o processo mais simples quando aplicado a lâmpadas de halogéneo e principalmente a sistemas LED. A aplicação em lâmpadas fluorescentes ou de mercúrio exige sistemas e métodos mais complexos. Concretamente nos sistemas LED, o ajuste da iluminação pode ser feito através de um controlo mais fino e possibilita uma maior flexibilidade a nível de controlo personalizado, permitindo ganhos de energia superiores e outras vantagens do ponto de vista do conforto visual [1]. Por outro lado, a redução dos níveis de iluminação proveniente da implementação destes sistemas permite reduzir a libertação de calor por parte das lâmpadas e, consequentemente, as necessidades de climatização através de equipamentos AVAC, retirando-se benefícios colaterais nesse sentido.

Prevê-se que a tecnologia de iluminação usando o sistema de LED seja disseminada no futuro próximo, devido às suas características, nomeadamente:

(i) Tempo de vida útil prolongado ;
(ii) Possibilidade de mistura de cores na luz ;
(iii) Amplitude do espectro luminoso ;
(iv) Flexibilidade no *design* devido às reduzidas dimensões das lâmpadas;
(v) Flexibilidade e facilidade no controlo e ajuste dos níveis de iluminação

As características da tecnologia LED irão potenciar o desenvolvimento do mercado da iluminação , solicitando a conceção de novos tipos de luminárias, bem como a implementação de novas estratégias de iluminação por parte dos designers. Todo esse esforço será motivado pelo enorme potencial deste tipo de tecnologia, cujo objetivo final é o de aumentar substancialmente a eficiência da iluminação e a qualidade da luz, a custos moderados [22]. Presentemente assiste-se a uma tendência que visa romper com o conceito de iluminação tradicional até agora disseminado, tendo sido lançadas políticas regulatórias por parte da UE[9] no sentido de excluir do mercado lâmpadas incandescentes, de mercúrio e determinados tipos de lâmpadas fluorescentes de baixa eficiência. Na Austrália, foi decidido em Fevereiro de 2009 que a importação de lâmpadas incandescentes seria abolida, tendo sido a mesma política delineada em 2007 para os EUA, prevendo essa extinção para o período entre 2012-2014.

[9] Lançadas em Abril de 2009

2.2.4 Edifícios do Futuro – Medidas da UE para o Longo Prazo

A Comissão Europeia lançou diversos projetos na área da Eficiência Energética em edifícios, como forma de atingir as metas destacadas para 2020, mais concretamente a redução em 20% do consumo energético e das emissões de CO_2. Em alguns países têm sido feitos esforços para atingir essas metas e a evolução tem sido positiva, sendo de destacar alguns casos.

A EPBD – *Diretiva da Performance Energética nos Edifícios*, estipulou que a partir de 2020, todos os novos edifícios construídos na União Europeia sejam edifícios de muito baixo consumo ou consumo nulo, os denominados n-ZEB. É nesse sentido que a implementação de "boas práticas" na fase de conceção dos edifícios, bem como a criação de economias de escala em tecnologias altamente eficientes se torna fundamental, além de contribuir para a diminuição dos níveis de desemprego, através da criação de milhares de novos postos de trabalho. Numa altura em que se estima que até 2050 sejam construídos mais de um quarto dos edifícios atualmente existentes, identificou-se um conjunto de medidas a ter em conta na construção inicial que podem contribuir para um potencial de redução dos custos de manutenção ao longo da sua vida útil a rondar os 80% [7].

Dentro das medidas estipuladas pela UE, apontou-se as emissões de CO_2 nos edifícios como fator crítico a ser mitigado, tendo sido colocados patamares entre os 88-91%, na redução destes gases comparando com índices referidos ao ano de 1990. Algumas das medidas sugeridas para melhorar a eficiência energética dos edifícios encontram-se na **Figura 2.37**.

Medida	Aquecimento	Arrefecimento	Ventilação	Iluminação	AQS
Materiais isolantes nas envolventes externas do edifício	x	x			
Janelas energeticamente eficientes (baixos coeficientes de transferência de calor)	x	x			
Existência de caixas de ar mais amplas entre paredes	x	x			
Ventilação natural e/ou mecânica com sistemas de recuperação de calor.	x	x	x		
Substituição de lâmpadas e luminárias				x	
Implementação de Sistemas solares passivos na construção de novos edifícios ou instalação nos existentes.	x	x		x	
Integração de Sistemas Solares activos no edifício		x		-	x
Sistemas de monitorização e controlo	x	x		x	

Figura 2.37 - Medidas de eficiência energética para Edifícios "*nZEB"* [7].

De acordo com [7], foi feito o cálculo das necessidades atuais para o desenvolvimento do mercado e criação de economias de escala para serem atingidos os objetivos estipulados pela UE no que respeita à implementação de edifícios do tipo *nZb* . Os resultados demonstraram que as tecnologias atualmente existentes necessitam de uma aposta mais forte e que o crescimento nos últimos anos não é suficiente para atingir esses objetivos, conforme evidencia a **Figura 2.38**.

Tecnologia	Mercado actual	Factor de crescimento
Materiais isolantes	2.010 M€	2 - 3
Ventilação com recuperação de calor	130.000 unidades	8 - 10
Vidros triplos	1.500.000 m2	>10
Bomba de calor	185.000 unidades	2 - 3
Pellets de aquecimento	43.000 unidades	2 - 3
Sistemas Solares Térmicos	3.700.000 m2	2 - 3

Figura 2.38 - Fatores de crescimento do mercado atual para satisfazer a procura futura [7].

2.2.5 Sistemas de Ar Condicionado Solar

Os sistemas de ar condicionado que recorrem a tecnologia solar são uma alternativa válida incluída no plano Europeu no ponto de vista da eficiência energética.

Estes sistemas possuem como estrutura base equipamentos produtores de frio a partir de energia térmica fornecida por equipamentos produtores de calor, normalmente coletores solares térmicos. Os restantes equipamentos que formam o conjunto do Sistema Solar de Ar Condicionado correspondem a tanques de armazenamento (acumulação), bombas de circulação e unidades de rejeição de calor, por exemplo, torres de arrefecimento.

Os sistemas solares térmicos atingiram um nível de maturidade considerável no sector comercial e industrial e são aplicações cada vez mais comuns nos dias que correm, existindo atualmente um leque amplo de sistemas disponíveis a um custo competitivo, tipicamente na gama de temperaturas de funcionamento abaixo dos 110ºC, mas também alguns a operar acima dos 130ºC, nomeadamente sistemas de eixo simples com seguimento solar e concentração ótica, cuja implementação não está ainda tão disseminada. Recentemente, novos conceitos destes sistemas têm vindo a ser desenvolvidos, com melhorias ao nível da eficiência dos coletores.

Atualmente, estão a ser implementadas um cada vez maior número de unidades para produção de frio a partir de uma fonte térmica, sendo essa aplicação bastante recorrente na grande indústria, através do aproveitamento dos gases de escape dos processos fabris (via cogeração) ou, em alternativa, através da queima direta de gás.

Estas unidades estão concebidas para funcionar num sistema de carga basal, com cargas constantes, sendo que a instabilidade decorrente do aproveitamento solar para produção de água quente não é a melhor solução [23]. Principalmente a partir da última década, foram feitos progressos nos equipamentos de refrigeração de pequena escala recorrendo a energia térmica, tendo os SSAC contribuído bastante para essa evolução. O grosso das empresas que conceberam os equipamentos e assentaram o seu modelo de negócio no desenvolvimento e comercialização destes sistemas são *startups* de pequena dimensão, tendo sido difícil criar economias de escala e disseminar a tecnologia. Os sistemas SSAC introduziram no seu modelo o conceito de armazenamento de calor, fazendo-o através de tanques/reservatórios de menor ou maior dimensão/capacidade térmica, consoante os objetivos do sistema sejam contornar as pequenas oscilações de produção dos coletores solares térmicos ou, por outro lado, cobrir a procura em extensos períodos onde o recurso solar é insuficiente. Os reservatórios estão localizados ou do lado da produção (fluido quente) ou do lado do consumo (fluido arrefecido). Além dos convencionais *chillers* elétricos, as tecnologias de produção de água arrefecida que se encontram disponíveis no mercado, umas mais disseminadas que outras, utilizam os princípios de absorção (efeito simples ou duplo), adsorção ou evaporação dessecante .

Os custos de investimento em SSAC são ainda um impedimento à sua implementação, resultando em projetos de rentabilidade bastante inferior aos sistemas convencionais com ciclos de compressão de vapor. A rentabilidade e o investimento inicial neste tipo de sistemas pode ser reduzido adotando uma estratégia que passa por usufruir dos sistemas solares térmicos como produtores de água quente no Inverno e como parte integrante de sistemas de arrefecimento no Verão. No entanto, a disseminação deste tipo de sistemas a um nível que permita criar economias de escala e dimensão de mercado está dependente do investimento em I&D, de forma a melhorar os índices de desempenho e reduzir o preços dos equipamentos.

O crescimento desta tecnologia a nível de pequenas instalações residenciais teve um súbito retrocesso em 2008 após a crise económica, quebrando a tendência dos anos anteriores. Em 2011, existiam cerca de 750 SSAC espalhados por todo o mundo, incluindo pequenas instalações (< 20 kW). Recentemente, foram concluídas algumas instalações de alta capacidade e outras encontram-se em fase de construção. Concretamente, Portugal é referenciado como um dos países pioneiros neste tipo de solução, com o exemplo real do sistema implementado na sede da Caixa Geral de Depósitos, onde foi instalado um sistema com capacidade de refrigeração de 400 kW suportado por uma área de coletores solares de 1.560 m^2 [24].

Figura 2.39 – Vista superior do Edifício Sede da CGD (Lisboa) [8].

O projeto foi concluído em 2008, num investimento total de 1,2 M€ (cerca de 770€/m^2 de área coletora) e tem como fins a climatização do edifício através de aquecimento de água para ar quente (aquecimento ambiente), aquecimento de águas sanitárias (A.Q.S), bem como produção de água quente para arrefecimento ambiente (Verão). Os ganhos conjuntos de energia do sistema permitem poupanças anuais de cerca de 1200 MWh (cerca de 5% do consumo de energia total do edifício), onde se estima que 500 MWh sejam para efeitos de climatização e 480 MWh para aquecimento de águas sanitárias e cozinha. Este é, de resto, o maior projeto de arrefecimento solar em toda a Europa e um dos poucos em todo o mundo a esta escala [8].

Figura 2.40 – Vista superior do Edifício Sede da CGD (Lisboa) [8].

Os custos de investimento inicial dos SSAC são, hoje em dia, difíceis de estimar, devido à economia de escala e número de instalações em funcionamento. O facto de existirem ainda poucos modelos implementados e grande parte deles serem subsidiados por fundos de I&D da UE, torna bastante mais difícil a avaliação económica dos projetos, concebendo-lhes um maior risco inicial. A fiabilidade destas estimativas permitiria reduzir o risco de construção e exploração deste tipo de instalações, uma vez que o investimento inicial representa grande parte dos custos da vida útil do projeto.

No entanto, existem alguns exemplos-tipo de projetos sem qualquer incentivo remuneratório, principalmente em países tropicais com elevados custos de eletricidade, situando-se o valor do investimento entre os 1240 e 2500 €/ kW [24].

2.3 Tecnologias AVAC para Climatização

A necessidade de conceber edifícios termicamente bem isolados é tanto maior quanto mais acentuada for a diferença entre as temperaturas exteriores do local onde o edifício se encontra e as temperaturas de conforto tidas como referência para o seu interior. Assim, em locais onde a temperatura ambiente é normalmente muito baixa ou muito elevada, perspetiva-se e recomenda-se um maior investimento em materiais isolantes, de modo a que as fugas e ganhos de calor sejam minimizadas ao máximo. No caso concreto de Portugal, o clima é relativamente ameno durante o Inverno e a frequência com que ocorrem dias muito frios não é elevada, comparativamente com a maior parte dos países da Europa, principalmente os países nórdicos.No entanto, o Verão quente do nosso país influencia bastante os balanços energéticos e exige um esforço suplementar por parte dos sistemas de climatização na regulação termostática, pelo que se justifica o investimento em materiais que possam, de alguma forma, limitar a transferência de calor entre o exterior e o interior dos edifícios e, com isso, evitar o investimento em equipamentos de climatização mais exigentes ou diminuir o seu fator de utilização. Efetivamente, por vezes é do interesse dos construtores omitir certos pormenores relativamente ao comportamento térmico de um edifício, nomeadamente as características térmicas e o tipo de isolamento das superfícies que o envolvem, tendo em conta que os materiais isolantes contribuem para o encarecimento dos custos de construção.

O senso comum de grande parte das pessoas não as alerta tanto para o tipo de material que constitui um edifício, mas mais para a vertente da estética ou localização. De certo modo, em termos de conforto, os seus ocupantes não são diretamente influenciados pela escassez que possa existir no seu isolamento, se equipados com sistemas de climatização para aquecimento e arrefecimento, uma vez que o desconforto que isso provocaria é compensado pela intervenção desses sistemas, que controlam a temperatura interior. No entanto, os custos decorrentes de um mau isolamento refletem-se na fatura energética no longo-prazo e poderão ser penalizadores ao longo do tempo, pois os sistemas de climatização instalados irão certamente consumir mais. Esta falta de sensibilidade tem vindo a ser combatida e, hoje em dia, os alertas para os consumos energéticos são cada vez maiores. A documentação do desempenho energético de um edifício novo por parte dos construtores é hoje em dia obrigatória. No caso concreto do edifício em estudo, será feita uma descrição dos materiais constituintes e respetivas propriedades térmicas.

Os processos que envolvem transferência de calor podem ocorrer sob a forma de condução, convecção ou radiação. No entanto, estas três formas de transmissão de calor podem co-existir nas várias fases de um mesmo processo, manifestando-se separadamente.

No âmbito dos sistemas AVAC, o conceito de termodinâmica está presente em toda a sua plenitude, justificando-se por esse facto detalhar as principais evoluções termodinâmicas que

existem neste tipo de sistemas antes de se introduzir o modo de funcionamento dos vários equipamentos que o constituem [33].

Tendo em conta que a transferência sob a forma de calor envolve variação de temperatura no sistema e que transferência sob a forma de trabalho envolve variações de volume, pode-se desde já fazer uma relação entre cada uma delas e os principais equipamentos que compõe um sistema AVAC, com base na assunção de que as evoluções nos diferentes equipamentos podem ser teoricamente caracterizadas pela existência de uma propriedade que se mantém constante.

$$\Delta E = \dot{m}dh = \dot{m}(Tds + vdp) \tag{2.1}$$

ΔE –Variação de energia (J)

$\dot{m}$ – Caudal mássico do fluido (m^3/s)

$v\ dp$ – Quantidade de trabalho realizado por unidade de massa

$T\ ds$ –Quantidade de calor trocado por unidade de massa

Neste seguimento, no caso ótimo de reversibilidade do sistema, pode-se considerar que equipamentos tais como compressores, ventiladores ou bombas circuladoras são, em teoria, exclusivamente caracterizados por fornecer trabalho ao fluido em questão. No caso de turbinas, o efeito é o oposto, ou seja, é obtido trabalho a partir do fluido em operação.

No caso desses equipamentos, simplifica-se a equação anterior em:

$$\Delta E = \Delta W = \dot{m}\ (vdp) \tag{2.2}$$

ΔW – Variação do trabalho (J)

Um exemplo oposto são os permutadores de calor, cujo intuito exclusivo é transferir calor sob a forma de variação da temperatura entre fluidos, não existindo neste caso qualquer transferência de trabalho[10]

$$\Delta E = \Delta Q = \dot{m}\ (Tds) \tag{2.3}$$

ΔQ – Variação do calor (J)

[10] Considerando o processo reversível

Tabela 2.1 - Propriedades termodinâmicas dos equipamentos AVAC [33].

Equipamento	Propriedade Alterada	Propriedade Constante
Bombas	Pressão	Entropia
Permutadores	Temperatura	Pressão
Ventiladores	Pressão	Entropia
Válvulas	Pressão	Entalpia
Turbinas	Pressão	Entropia
Compressores	Pressão	Entropia
Torres de Refrigeração	Temperatura	Pressão

Os equipamentos são projetados para otimizar a sua função, ou seja, alterar apenas a(s) propriedade(s) que diz(em) respeito para atingirem o fim a que se destinam. No entanto, a não linearidade dos processos que ocorrem no mundo real tem influência no seu desempenho, pelo que não existem equipamentos irredutíveis a falhas, do mesmo modo que não existem sistemas perfeitos [33]. Deste modo, um compressor ou um ventilador idealmente adiabáticos estão sujeitos à influência das condições não controláveis (ou pelo menos não diretamente), tais como o atrito criado pelo movimento dos fluidos que conduz a um aumento de temperatura que pode não ser significativo mas que, inevitavelmente, implicará um aumento de entropia no sistema. Os processos de aquecimento, arrefecimento, compressão e expansão estão na base de todo o sistema AVAC. Para além destes existem outros processos associados especialmente a misturas, como é o caso da humidificação/desumidificação e da absorção.

Seguidamente, será descrito o comportamento dos fluidos refrigerantes, em ciclos frigoríficos de compressão de vapor e absorção, bem como a evolução do ar húmido nos equipamentos de ventilação do tipo *"tudo-ar"* , como é o caso das Unidades de Tratamento do Ar.

2.3.1 Arrefecimento

2.3.1.1 Ciclos frigoríficos de compressão de vapor

Este tipo de circuito tem como objetivo arrefecer o fluido que irá ser distribuído para os diversos pontos de consumo. Para tal, a transferência de calor é feita entre o fluido circulante (refrigerante) e o fluido de distribuição através de um permutador de calor. A **Figura 2.41** mostra o modo de funcionamento de um ciclo frigorífico de compressão de vapor.

Para o caso concreto, é utilizado uma Unidade Produtora de Água Refrigerada (*chiller*) de compressão para a produção de água refrigerada a ser distribuída às unidades locais. A

condensação é feita recorrendo à ventilação forçada de ar, ou através de condensadores a água e a evaporação por expansão direta. O refrigerante circula num circuito fechado e está sujeito a diferentes condições de pressão e temperatura ao longo do ciclo.

Numa primeira fase, para dar lugar ao arrefecimento torna-se necessária uma transferência de calor no sentido **fluido de distribuição (secundário)→ fluido refrigerante (primário)**, onde este último recebe o calor libertado pelo primeiro, arrefecendo-o até à temperatura de projeto. Para que o ciclo se complete e este processo se repita progressivamente de acordo com os princípios da termodinâmica, as condições iniciais do fluido refrigerante têm de ser restabelecidas, tendo em conta que as suas propriedades se alteram após a transferência de calor. Como tal, o fluido refrigerante deverá libertar o calor que recebeu para outro meio.

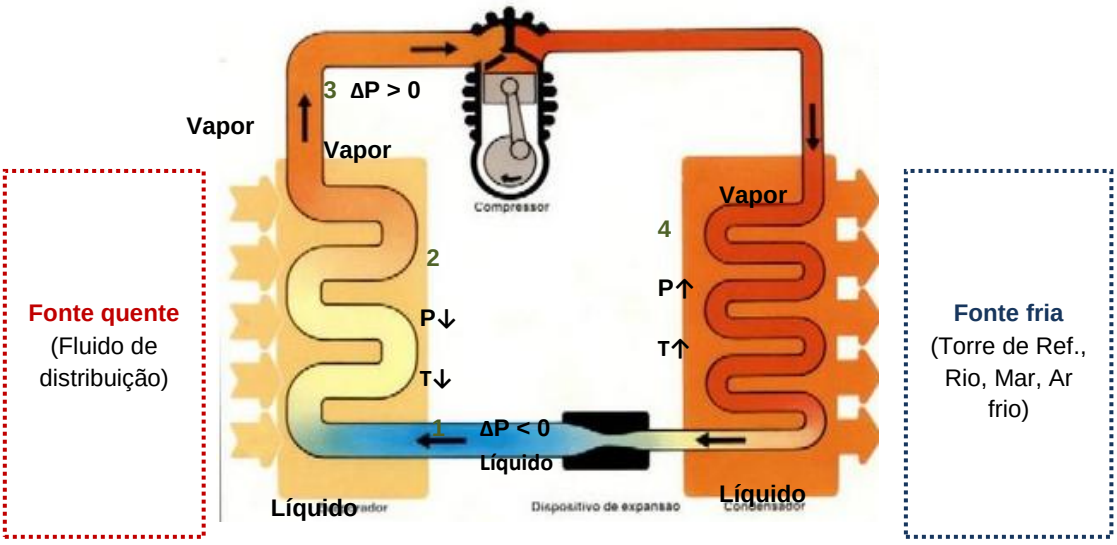


Figura 2.41 - Ciclo de compressão de vapor com as diferentes fases e equipamentos [20].

Concretamente, a primeira fase do ciclo é feita a partir da evaporação do fluido refrigerante, usando-se para o efeito um evaporador (permutador frio/quente). Para que exista maximização da transferência de calor, esta deverá ocorrer a temperatura constante (transferência de calor latente) e durante a mudança de fase e o refrigerante deverá ser uma substância pura. Neste caso, para recolher o calor libertado pelo fluido de distribuição, o refrigerante deverá adquirir as condições de pressão e temperatura adequadas para que exista evaporação (pressão e temperatura baixas) (2).

Normalmente, para se conseguir uma redução significativa da pressão são usados dispositivos de expansão (válvulas), que ajustam os níveis de caudal impondo ao fluido uma queda de pressão.O vapor ininterrupto que se vai formando com a evaporação tem tendência em aumentar a pressão. Para contrariar esse efeito é usado um compressor que aspira o vapor, comprime-o e descarrega-o na linha de descarga, à entrada do condensador (3). Nesta fase, o vapor ao passar pelo condensador vai perdendo calor para o meio exterior que está a uma temperatura inferior, condensando. Por vezes a condensação dá-se na permuta entre o vapor

circulante e a água proveniente de uma torre de refrigeração ou de um rio (sistemas água/água), que estão a temperaturas bastante mais baixas ou simplesmente com ar exterior através de ventilação forçada (sistemas ar/água), como é o caso (4).

O facto de condensar permite uma redução da pressão e, consequentemente, a entrada de mais vapor no condensador. Para restabelecer as condições iniciais do fluido, o mecanismo de expansão é usado para o retirar do condensador e para alimentar o evaporador [33].

2.3.1.2 Ciclos frigoríficos de Absorção

A grande diferença entre este tipo de sistemas e os sistemas de compressão a vapor prende-se com o facto de, neste caso, o processo de compressão envolver um conjunto de componentes que substituem o compressor eléctrico, tornando-se portanto mais complexo do ponto de vista de conceção e implementação.

Para além do condensador, evaporador e mecanismo de expansão, este sistema engloba também um gerador de calor, absorvedor, permutador, bombas de circulação e um mecanismo de expansão adicional (válvula). A interação entre estes componentes associados ao evaporador e condensador permite realizar o processo de compressão de forma eficiente.

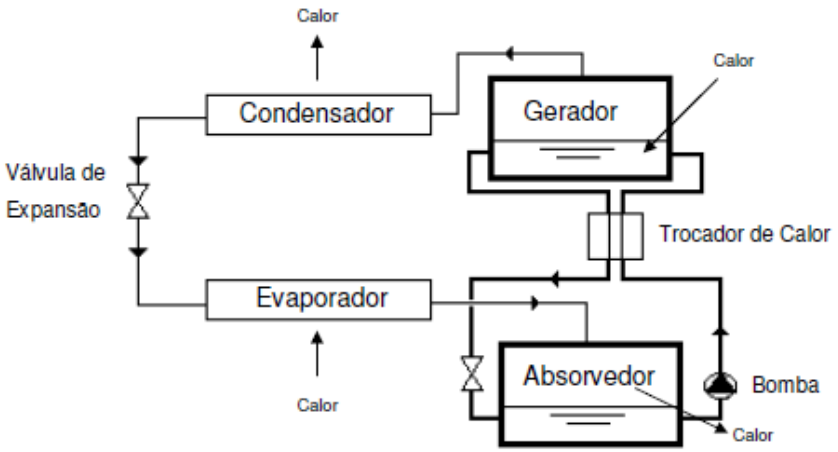


Figura 2.42 – Princípios básicos de um ciclo de absorção num sistema de refrigeração [20].

Concretamente, o vapor que sai do evaporador a baixa pressão vai misturar-se com o fluido que provem de um gerador de calor (igualmente a baixa pressão), existindo absorção do vapor por parte deste fluido. Desse processo resulta libertação de calor e consequente contração do volume da mistura, permitindo a contínua aspiração do vapor à saída do evaporador. Para manter a temperatura no absorvedor e promover as condições ótimas para o processo de absorção torna-se necessário retirar o calor da sua envolvente. Para esse efeito é usada uma bomba de circulação, que eleva a pressão do fluido e o transporta de novo até ao gerador.

Nesse trajeto, existe uma permuta de calor entre o fluido que vem do gerador a alta temperatura (**gerador → absorvedor**) e o fluido de retorno (**absorvedor → gerador**), que se encontra a uma temperatura mais baixa. Este último vai ver a sua temperatura aumentar, evaporando-se parcialmente. As temperaturas de ida e de retorno do fluido, bem como a parametrização do permutador de calor, são calculadas de modo a que parte do fluido de retorno se evapore e parte se mantenha no estado líquido, existindo separação de caudais aos terminais do gerador. Nesta fase, a parte do fluido que se evapora segue para o condensador e troca calor com o meio exterior, dando sequência ao processo de refrigeração do ciclo. O vapor que chega ao condensador está a uma temperatura e pressão elevadas devido às condições impostas na permuta, à imagem do que acontece no ciclo de vapor. Por outro lado, a parte do fluido que se manteve no estado líquido realimenta o gerador, sendo encaminhado para o absorvedor, passando por uma etapa intermédia onde a pressão diminui por efeito da acção de um mecanismo de expansão, cujo intuito é maximizar o efeito de absorção e libertação de calor na mistura formada com o vapor que continuamente sai do evaporador [33].

Conforme se observa na **Figura 2.42**, o conjunto Gerador - Absorvedor substitui o compressor elétrico usado nos ciclos de compressão de vapor. O processo envolve a interação de duas substâncias, um soluto e um solvente, onde este último absorve o primeiro no absorvedor. A fonte quente necessária para o processo, o gerador, pode ter diversas aplicações e pode estar na forma líquida ou na forma de vapor, conforme o tipo de UPAR (*chiller*) utilizada.

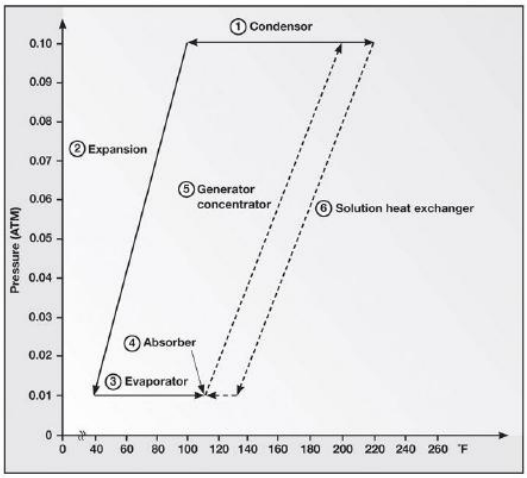


Figura 2.43- Variação da pressão e temperatura nas várias fases do arrefecimento [20].

A eficiência do *chiller* é medida através do seu *Coefficient Of Performance,* através de uma relação entre a quantidade de calor retirada do ar ao nível do evaporador e a quantidade de calor fornecida pelo gerador:

$$COP = \frac{Q_{evaporador}}{Q_{gerador}} \tag{2.4}$$

$Q_{evaporador}$ – Calor retirado do ar por meio do evaporador;

$Q_{gerador}$ - Calor fornecido pela fonte geradora de calor (sistema independente do *chiller*)

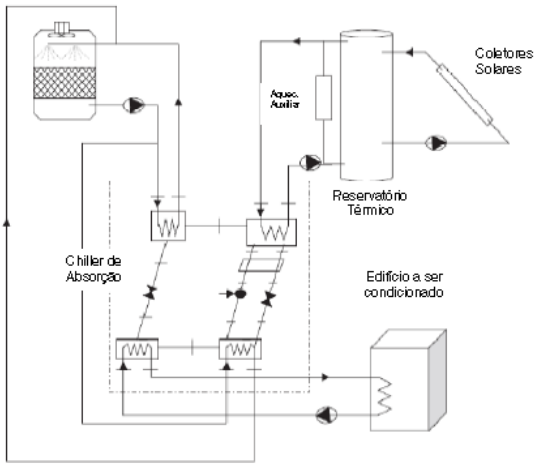


Figura 2.44 - Esquema de Funcionamento de um *chiller* de absorção alimentado por Coletores Solares Térmicos [20].

Na **Figura 2.44**, representa-se um sistema de refrigeração recorrendo ao princípio de absorção e com alimentação do gerador recorrendo a energia solar, mais concretamente com a instalação de coletores solares térmicos associados a um tanque de armazenamento de calor. O reservatório permite adequar as dinâmicas de produção de água quente por parte do sistema solar com a dinâmica de produção e fornecimento de água refrigerada por parte do *chiller*, garantindo assim um funcionamento constante por escalões às condições de funcionamento do próprio *chiller*. O calor removido no ciclo, tanto ao nível do condensador como do absorvedor, é feito recorrendo a uma torre de refrigeração através de um permutador, sendo o calor de rejeição na permuta retornado à torre. A torre de refrigeração é dimensionada para a capacidade do *chiller* e é parte integrante do sistema em grande parte das instalações, exceção feita a instalações que se localizam perto de fontes naturais, onde o ciclo de condensação pode ser feito recorrendo a água do rio ou do mar.

Essa aplicação é bastante recorrente em centrais de produção descentralizada de calor e frio (*district cooling/heating),* a partir das quais é feita a distribuição local às várias fontes de consumo, através de redes de frio e/ou calor.

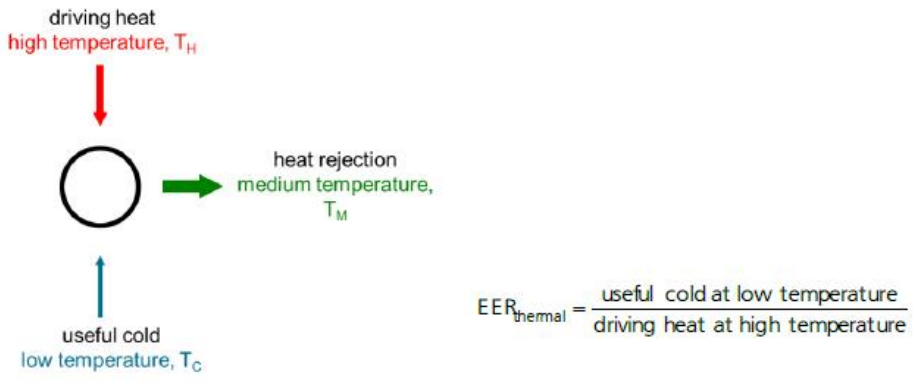


Figura 2.45 - Ciclo de condensação no processo de refrigeração de água [20].

Todavia, o âmbito deste projeto não se enquadra nesse tipo de sistemas, mas sim em sistemas de produção e distribuição local de frio e calor.

Nos sistemas de absorção, o tipo de substâncias utilizadas em mais larga escala no processo de absorção é o conjunto Água/ Brometo de Lítio, podendo no entanto serem empregues outras substâncias.

Existem diversas configurações de *chillers* de absorção disponíveis no mercado, sendo relevante distingui-los no que respeita ao seu desempenho e regime de funcionamento. Concretamente, os *chillers* simples, de duplo e de triplo efeito têm o seu desempenho diferenciado pelas fases existentes no processo de separação do fluido refrigerante diluído no absorvente.

A eficiência do processo está relacionada com a temperatura de fornecimento do gerador, numa relação de proporcionalidade. Por outro lado, quanto maior a temperatura do fluído ao nível do gerador, menor a capacidade necessária para o equipamento de produção de calor (Sistema Solar Térmico) e, consequentemente, a área coberta pelos coletores.

Tabela 2.2 - Propriedades da fonte quente em função do tipo de chiller e respetivo COP [20].

Tipo de Sistema	COP usual	Temperatura do fluido quente (°C)	Calor solar requerido (kW) *	Tipo de coletor	Área de coletor requerida (m²) *
simples-efeito	0,7	85	1,43	coletor plano	7,48
duplo-efeito	1,2	130	0,83	coletor plano ou CPC**	5,07
triplo-efeito	1,7	220	0,59	tubo a vácuo ou concentrador	4,49

* Estimativas por kW de resfriamento do ambiente condicionado;
** Compound Parabolic collector

Um dos principais incentivos ao optar por sistemas de refrigeração via absorção é o facto de que o calor utilizado no processo permite uma redução substancial de emissões de CO_2 em relação à energia elétrica utilizada no ciclo de compressão de vapor, nos casos em que essa energia provém de fontes de produção que usam combustíveis fósseis [38].

O aumento progressivo das necessidades de arrefecimento a nível mundial perspetiva para o futuro uma maior procura de energia elétrica, o que pressupõe um incentivo na construção de novas centrais produtoras, térmicas ou renováveis, para suportar essa procura. No entanto, esse incremento na capacidade instalada de fontes de produção pode ser amenizado no caso em que se recorra a sistemas de refrigeração alimentados por energia térmica, quer sob a forma de vapor, quer sob a forma de água aquecida. Essas duas formas de energia térmica podem ser exploradas e potenciadas recorrendo, quer a centrais de cogeração onde a produção de eletricidade redireciona os gases de escape sob a forma de calor para esse efeito, quer através de mini-centrais solares térmicas que alimentam os sistemas de refrigeração dos edifícios com água aquecida.

Outra vantagem da aplicação deste tipo de sistemas passa por contornar e evitar a volatilidade dos preços de eletricidade a que atualmente assistimos. Como desvantagem, os sistemas de absorção possuem valores de COP bastante inferiores aos sistemas clássicos. Além disso, as necessidades de refrigeração na permuta de calor são bastante superiores em sistemas de absorção, pelo que a capacidade das torres de refrigeração têm de ser superiores neste tipo de sistemas no caso de não existirem fontes de arrefecimento naturais. Por fim, os sistemas de absorção que utilizam fontes renováveis são alvo de um investimento económico bastante superior, envolvendo custos de investimento elevados no Sistema Solar Térmico (coletores térmicos, reservatórios de água quente, equipamentos auxiliares), bem como no próprio *chiller,* cujo custo é superior aos *chillers* convencionais.

2.3.2 Sistemas "Tudo-ar"

Em sistemas do tipo "tudo-ar" os espaços a climatizar são alimentados por equipamentos que utilizam exclusivamente ar para controlar, quer a qualidade do ar interior, quer as temperaturas definidas para as várias zonas. Concretamente, este tipo de sistemas altera as condições do ar interior de um espaço, retirando-lhe ou fornecendo-lhe calor e humidade, em processos de aquecimento, arrefecimento, humidificação e desumidificação.Normalmente são usados diagramas psicrométricos para descrever o comportamento por etapas deste tipo de sistemas, de modo a ser possível projetar os equipamentos e definir as respetivas potências nominais que permitam uma otimização da remoção das cargas internas das várias zonas.

As zonas a climatizar são caracterizadas por possuírem cargas sensíveis (relacionadas com a temperatura) e cargas latentes (relacionadas com a humidade), cuja existência em excesso ou em défice deve ser evitada. As Unidades de Tratamento do Ar são utilizadas com esse propósito, sendo constituídas por diversos equipamentos sequenciais com controlo independente. Podem incluir equipamentos tais como ventiladores, recuperadores de calor e cada equipamento faz parte de um módulo de fácil acesso para efeitos de manutenção. A sua configuração pode ser linear ou em "L", com 1 ou 2 andares.

Apesar da multiplicidade de funções, as UTA foram concebidas, tal como o nome indica, para garantir uma boa qualidade do ar interior. Nesse pressuposto, devem insuflar ar novo nos espaços em maior ou menor quantidade, retirando as impurezas que este possa conter à entrada da UTA e misturando-o eventualmente com ar de retorno dessas zonas para ajustes de temperatura na insuflação.

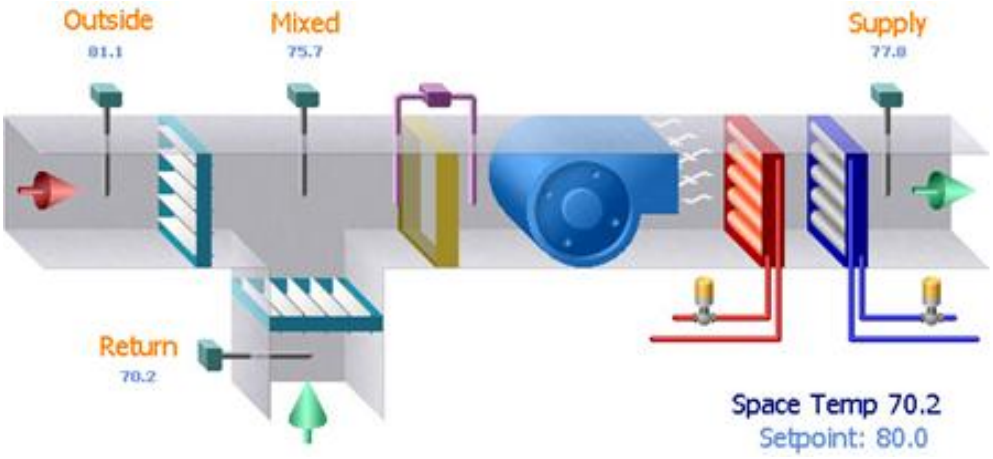


Figura 2.46- Esquema de uma UTA.

O aquecimento e arrefecimento são normalmente feitos através de baterias de água quente/fria e resultam idealmente do aumento/diminuição da temperatura do ar de insuflação, sem variação da humidade específica. No caso em que existe arrefecimento com desumidificação, à redução da temperatura seca (arrefecimento sensível) junta-se a redução da humidade específica (arrefecimento latente) sempre que a temperatura de saturação seja atingida (ponto de orvalho). Normalmente, nestes casos, na bateria de arrefecimento circula água a uma temperatura inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar, levando a uma condensação do mesmo durante a permuta, que resulta numa redução da humidade específica do ar e na produção de condensados [33].

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar}(h_1 - h_2) - m_{liq}h_{liq} \qquad (2.5)$$

$\dot{Q}$ – Potência de aquecimento

$\dot{m}_{ar}$ – Caudal mássico do ar circulante

h_1 – Entalpia inicial do sistema

h_2 – Entalpia final do sistema

m_{liq} - Caudal mássico dos condensados resultantes da condensação do ar

h_{liq} - Entalpia dos condensados resultantes da condensação do ar

Normalmente, a equação 2.5 pode ser simplificada, uma vez que a energia associada ao caudal de condensados é desprezável relativamente à energia contida no caudal de ar.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar}(h_1 - h_2) \tag{2.6}$$

Contrariamente, o aumento da humidade específica do ar (humidificação) resulta da injeção de vapor de água. Idealmente, o processo de humidificação é um processo latente (feito a temperatura constante). No entanto, como o vapor não pode ser injetado à temperatura seca do ar, existe sempre obrigatoriamente um ligeiro aquecimento sensível inerente ao processo.

Um processo bastante utilizado e que contribui bastante para a poupança energética corresponde à utilização exclusiva de ar exterior para fazer o arrefecimento das zonas – *free cooling*. Este processo é realizado através de sensores de temperatura exterior que, a cada momento registam o valor dessas temperaturas. As unidades de controlo processam as temperaturas medidas e, no caso de serem inferiores às temperaturas internas de projeto, os ventiladores das UTA insuflam o ar novo sem qualquer intervenção por parte das baterias de arrefecimento (apenas com tratamento de filtragem do ar). De igual modo, contribuindo para a poupança energética através da redução da carga das baterias de aquecimento/arrefecimento, as UTA possuem recuperadores de calor através dos quais se efetua um pré-tratamento térmico do ar novo através da permuta com ar de retorno da instalação

A permuta feita entre ar novo e ar de extração pode ser apenas de carácter sensível, implicando variação da temperatura, ou pode existir igualmente um ajuste na humidade do ar injetado, sendo neste caso também uma troca latente. São várias as configurações e os tipos de UTA em relação ao tipo de permuta, sendo que no primeiro caso são usualmente utilizados permutadores de placas e no segundo caso rodas entálpicas [33].

Para o presente trabalho, a utilização destas unidades é projetada com vista ao cumprimento das normas de QAI e à otimização da fatura energética:

(i) Cumprimento dos caudais mínimos de ar novo impostos para cada zona, assim como o número de renovações por hora

(ii) Possibilidade de efetuar "*free cooling*" sempre que possível, particularmente nos períodos noturnos de Verão

(iii) Compensar a falta de ventilo-convetores nas zonas de laboratórios (fachada poente) durante o período de Inverno

(iv) Reduzir a necessidade de dissipação de cargas térmicas de aquecimento/arrefecimento por parte dos equipamentos terminais (ventilo-convetores)

2.3.3 Sistemas a água

Os sistemas a água têm como particularidade o facto de utilizarem equipamentos centralizados para produção térmica (arrefecimento e aquecimento), nomeadamente caldeiras, *chillers* e bombas de calor. Num edifício de serviços normalmente existem várias cargas localizadas em pontos diferentes. Nestes casos, o método mais comum de refrigeração/aquecimento passa por arrefecer/aquecer água que está a uma determinada temperatura e levá-la aos vários pontos de consumo (normalmente equipamentos de refrigeração locais – ventilo-convetores) através de bombas de distribuição.

O tipo de instalações varia de acordo com o seu modo de funcionamento:

- Sistema direto: Circulação dos circuitos de produção (primário) e distribuição (secundário) são comuns.

- Sistema indireto: Circulações primária e secundária distribuídas por circuitos independentes.

No primeiro caso, torna-se fundamental que exista um equilíbrio entre as potências térmicas de produção e distribuição, caso contrário o equilíbrio hidráulico pode ficar comprometido. As vantagens relativas aos sistemas indiretos tornaram-se evidentes ao longo do tempo e a sua recorrência tem sido cada vez maior, permitindo um abandono gradual dos sistemas diretos, que antigamente caracterizavam a grande maioria das instalações. Concretamente, as vantagens dos sistemas indiretos prendem-se com o facto de os caudais de preparação e distribuição serem independentes e os estritamente necessários para cumprir as cargas instantâneas e permitir regimes estáveis de funcionamento.

De igual modo, a redundância do sistema e a sua maior flexibilidade podem ser conseguidas através da existência de múltiplos sistemas de bombagem associados a diversos circuitos de distribuição. Isto permite uma segmentação dos edifícios por zonas de distribuição e assume especial relevância em edifícios de dimensão considerável, onde a orientação das várias fachadas lhes confere diferentes condições de funcionamento.

Nestas circunstâncias, a carga instantânea pode variar bastante entre as várias zonas e consequentemente, os caudais de alimentação também deverão ser diferentes.

Uma das grandes evoluções no ponto de vista da distribuição foi a conceção e substituição de bombas de caudal constante por bombas de caudal variável. Este tipo de aplicação permite abastecer as cargas consumidoras de forma energeticamente mais eficiente na medida em que prescinde da utilização de válvulas de 3 vias (caudal constante) em detrimento de válvulas de 2 vias. No entanto, a utilização de bombas de caudal variável é tecnicamente mais complexa.

Na implementação de sistemas de caudal variável, há que ter em conta certos aspetos que devem ser respeitados, sendo eles:

- A variação do caudal deve ser controlada por um pressostato diferencial colocado na zona mais crítica do circuito (ao invés de ser colocado à saída da bomba de circulação).

- Garantir uma circulação mínima do refrigerante (entre 8% a 10%), através da utilização de um sistema "*bypass*" colocado no fim da rede hidráulica sempre que as válvulas de 2 vias estiverem completamente fechadas, garantindo assim a circulação por toda a rede hidráulica solicitando imediatamente a potência pedida pelos equipamentos consumidores.

Tipicamente, os sistemas a água podem ser a dois ou a quatro tubos. Nos sistemas centralizados a 4 tubos, existe um circuito fechado de ida e retorno independente para o aquecimento e arrefecimento. A grande vantagem dos sistemas a quatro tubos é o facto de possibilitarem o aquecimento e arrefecimento simultâneo, consoante as necessidades. Este tipo de aplicação é mais aconselhável em edifícios cuja orientação das várias zonas seja variado e lhes confira diferentes condições de funcionamento. Nesses casos, pode dar-se a necessidade de uma determinada zona estar a ser alimentada pelo circuito de aquecimento e outra zona estar a necessitar de arrefecimento. Nos sistemas a dois tubos não existe essa flexibilidade, existindo um circuito comum onde é alternada a circulação de água quente e água refrigerada. Devido aos custos bastante mais reduzidos destes sistemas, estes poder-se-iam tornar rentáveis relativamente aos sistemas a 4 tubos em edifícios que fossem caracterizados apenas por zonas de igual comportamento térmico Ainda assim, poderiam não ser suficientes para satisfazer os requisitos de uma zona térmica uma vez que a sua dinâmica de transição quente/frio e vice-versa não é instantânea, sendo tanto mais longa quanto maiores forem as diferenças de temperatura entre os ciclos de calor e de frio.

Normalmente, o regime adotado na refrigeração corresponde a 7ºC de ida e 12ºC no retorno (ΔT=5ºC) e para o aquecimento 80/70ºC de ida e 70/60ºC no retorno (ΔT=10ºC) ou 48ºC de ida e 43ºC de retorno (ΔT=5ºC). ,consoante o aquecimento seja feito através de caldeiras (primeiro caso) ou bombas de calor (segundo caso).

Em sistemas que alternam entre temperaturas mínimas de 5ºC e máximas de 80/90ºC e que exigem elevados caudais, o *switch* pode demorar alguns dias, sendo normalmente 24 horas o período mínimo. Pelo mesmo facto, a adoção de uma estrutura comum que comporta fluidos com diferenças de temperatura desta ordem de grandeza, está sujeita a um risco bastante acrescido de dilatações ou contrações do material e, consequentemente, ao seu desgaste prematuro [33].

2.3.4 Sistemas de expansão direta

Este tipo de sistemas engloba equipamentos *roof-top, split, multi-split* ou VRV, cuja particularidade é aliarem as características dos sistemas de tipo centralizado e individual, podendo por isso ser considerados sistemas semi-centralizados. Efetivamente, este tipo de sistemas são compostos normalmente por uma ou duas unidades exteriores e algumas unidades interiores.

(i) Sistemas VRV

Este tipo de sistemas é modular na medida em que serve um conjunto de zonas de um edifício (vários espaços) mas engloba um único circuito que as abastece (circuito do fluido circulante) , sendo composto por uma ou mais unidades exteriores e algumas unidades interiores. O sistema pode ser ampliado através do aumento do número de unidades interiores (pode superar as 30 unidades).

(ii) Sistemas *Multi-Split*

Geralmente servem uma zona *open-space* ou um número restrito de espaços, sendo constituído por uma unidade exterior e algumas unidades interiores (no máximo 9). É modular no sentido em que se pode efetuar a extensão do sistema através da instalação de um ou mais sistemas adicionais servindo as novas áreas climatizadas, sendo esses sistemas totalmente independentes.

Os sistemas VRV e *multi-split*, apesar das semelhanças que possam aparentar, não devem ser confundidos quanto à sua estrutura, tendo em conta que no âmbito do RSECE são considerados equipamentos de diferentes tipos, estando os sistemas VRV associados aos sistemas centralizados e os *multi*-split aos sistemas unitários/individuais.

3. Descrição e Modelação do Edifício

3.1 Enquadramento

O edifício sobre o qual recaiu o tema desta dissertação trata-se do Edifício X do Departamento de Engenharia Electrotécnica da FCT-UNL.

Estruturalmente, o edifício é composto por quatro pisos, sendo que três deles se caracterizam por serem espaços úteis, ou seja, espaços frequentados pelos seus ocupantes e onde, consequentemente, estes exercem algum tipo de actividade. Neste caso concreto, trata-se de um edifício de ensino, autónomo ao nível dos sistemas térmicos e ambientais, onde decorrem aulas, em Laboratórios e Salas de aula e onde os docentes realizam as suas restantes actividades académicas, nos respectivos Gabinetes.

Nesse âmbito, trata-se de um edifício onde a actividade decorrente é essencialmente de cariz intelectual, factor que à partida pode querer significar pouco, mas que na realidade tem alguma influência no âmbito da projecção de equipamentos de climatização e simulação energética. No que respeita à planta e estrutura do edifício, os pisos 1, 2 e 3 são compostos por múltiplas Salas de aula, Laboratórios, Gabinetes, bem como outras divisões de perfil académico – Secretaria e Sala de computadores, ou técnico - Sala de apoio técnico ou de Arrumação.

Figura 3.1 - Vista da fachada Nascente do Edifício X.

Importa referir o facto de que a modelação estrutural do edifício foi feita tendo por base a sua planta original e que, tendo existindo no passado algumas remodelações em diversas secções, as mesmas impossibilitam no presente uma coerência com a estrutura original do edifício. Concretamente, zonas referenciadas no projecto AVAC do edifício, como é o caso da Biblioteca ou do Bar, sofreram alterações e hoje em dia funcionam como Salas de aula e/ou Salas de estudo.

Ao salientar este facto, pretende-se de algum modo alertar para eventuais oscilações no que respeita o consumo energético que se verificava nessas zonas, comparativamente com o que

se regista actualmente, para condições externas e internas semelhantes[11]. A explicação baseia-se no facto de que zonas com diferentes propósitos, como é o caso de um bar e de uma sala de aula, a funcionarem com requisitos térmicos semelhantes (temperaturas e humidades relativas) , têm a si associadas diferentes cargas internas, nomeadamente no que respeita ao número de pessoas que frequentam o espaço, à quantidade de calor sensível que cada pessoa liberta, ao número e potência térmica dos equipamentos eléctricos instalados, entre outros.

Figura 3.2 - Vista da fachada Nascente Poente do Edifício X.

Todos estes factores envolvem fluxos de calor que fazem variar com maior ou menor intensidade a temperatura interior da zona, o que irá provocar uma regulação termostática mais ou menos acentuada e pressupor variações no consumo energético que poderão ser significativas, especialmente quando estão envolvidos balanços energéticos relativamente extensos (anuais).

3.2 Descrição

No âmbito da modelação, considerou-se Zona Térmica todo o espaço com ocupação humana e cuja envolvente é limitada por paredes, tecto e pavimento. As zonas térmicas são definidas separadamente para que se possa simular e obter balanços térmicos em cada uma delas, permitindo com isso uma análise dedicada dos consumos e discriminando com um rigor apurado as fontes consumidoras de maior energia (simulação *multi-zona*).

[11] Condições ambientais, características da envolvente, temperaturas interiores de referência

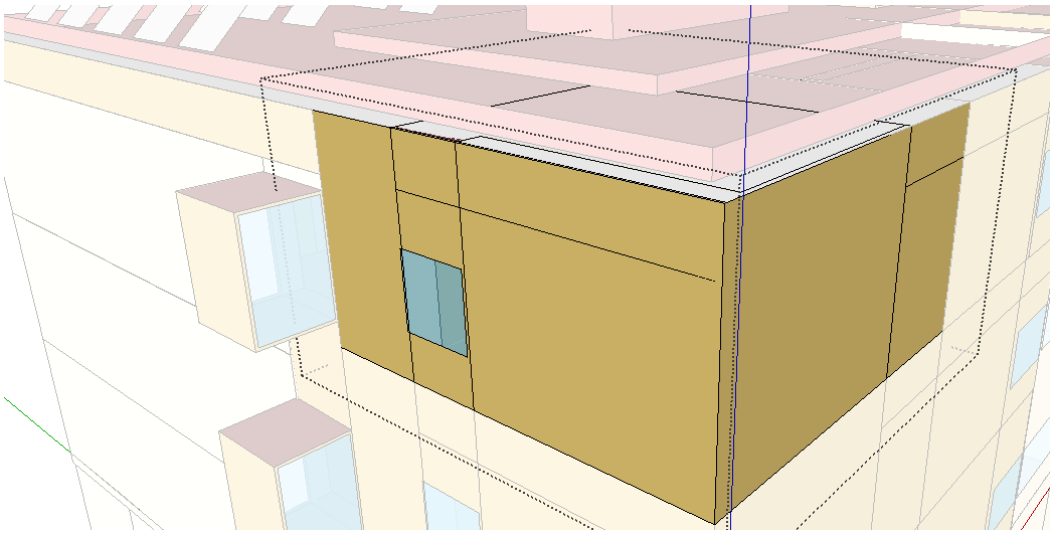


Figura 3.3 - Zona definida no Modelo gráfico do Edifício X (*Google SketchUp).*

O piso 0 encontra-se a um nível subterrâneo, sendo uma zona essencialmente destinada à manutenção dos equipamentos correspondentes à central térmica, nomeadamente a caldeira e queimador, os quais são responsáveis pela preparação da água quente a ser distribuída aos sistemas locais de climatização existentes nas várias zonas. Mais uma vez, esta zona tem sofrido algumas modificações e hoje em dia a sua utilização é recorrente também para outros fins.

A cobertura do edifício é uma zona que se encontra situada acima do piso 3 e exposta ao exterior. Este espaço é onde se encontram as duas unidades de tratamento ambiental (UTA) e as unidades de refrigeração do edifício, mais concretamente, o *Chiller* de compressão centrífuga (elétrico) do tipo ar/água. É a partir destes equipamentos que os circuitos de distribuição irão alimentar os equipamentos locais inseridos em cada zona do edifício. No entanto, sendo este um espaço que se encontra em contacto direto com o ambiente exterior, torna-se irremediavelmente alvo de um desgaste maior por parte dos seus equipamentos. O correto funcionamento destes equipamentos deve então ser assegurado a todo o instante, através de manutenções periódicas, uma vez que o funcionamento dos mesmos fora dos padrões de referência compromete seriamente o desempenho dos equipamentos terminais e as condições nos espaços interiores.

No edifício, foram definidas 74 zonas térmicas, nas quais 9 delas não estão sujeitas a climatização. Essas zonas correspondem às 6 instalações sanitárias (onde existe apenas extracção do ar), cobertura, oficina de manutenção (piso 0) e corredor central.

Figura 3.4 - Vista interior do Edifício X.

(i) **Piso 0** - Zona não ocupada, não existem preocupações ao nível do conforto térmico, sendo portanto despropositados quaisquer gastos energéticos para efeitos de climatização. No entanto, esta Zona interage com o Piso 1, na medida em que a sua superfície superior se encontra em contacto com o pavimento do piso superior, existindo irremediavelmente trocas de calor que influenciam o balanço térmico das zonas climatizadas.

(ii) **Cobertura** - serve para alojar os equipamentos de preparação a nível da central térmica.

(iii) **Instalações sanitárias -** Espaços de passagem de curta duração, não sujeitos a ocupação constante e/ou permanente, pelo que não se justifica estabelecer padrões de conforto térmico no seu interior

(iv) **Corredor central** - Zona circulante dos 3 pisos do edifício, sendo uma zona de passagem ou de ocupação provisória. Apesar de se tratar de um espaço que deve exigir algum conforto térmico, este é efectivamente assegurado através dos processos de transferência de calor que permitem trocas constantes entre as múltiplas zonas climatizadas e o corredor central. Esta transferência de calor dá-se através da superfície interior das várias salas, que estão em contacto com esta zona.

No que respeita às zonas climatizadas e zonas que influenciam o balanço térmico, bem como ao tipo de equipamentos instalados e permuta de calor, estas podem ser divididas da seguinte forma:

(i) **Laboratórios -** Ventilo-convectores a 2 tubos para arrefecimento, insuflação de ar novo através de uma UTA e rejeição por transferência.

(ii) **Salas de aula/Estudo** - Ventilo-convectores a 2 tubos para arrefecimento, insuflação de ar novo através de uma UTA e rejeição por transferência.

(iii) **Gabinetes e Salas de Apoio Técnico** - Ventilo-convectores a 2 tubos para arrefecimento, aquecimento, insuflação de ar novo através de uma UTA e extracção de ar viciado através de um ventilador de extracção.

(iv) **Instalações Sanitárias** – Extracção do ar viciado através de ventiladores de extracção. Não existe controlo termostático.

(v) **Zonas de circulação dos pisos 1, 2 e 3** – Renovação do ar através de transferência entre as zonas dos laboratórios, extração do ar viciado de forma natural através de *courettes*

Tabela 3.1- Condicionamento térmico por tipo de Zona do *Edifício X.*

Zona	AQ	ARR	Ar novo	Extração do ar
Laboratórios	X	√	√	X
Gabinetes	√	√	√	√
Salas de Aula/Estudo	X	√	√	X
Instalações Sanitárias	X	X	X	√
Zonas de circulação	X	X	X	√
Piso 0	X	X	X	X
Cobertura	X	X	X	X

Para efeitos de climatização, as condições de projeto estabelecem uma temperatura de bolbo seco exterior (não inclui o vapor de água do ar húmido) de 3,5ºC no Inverno e 32ºC no Verão. Em relação às condições térmicas de cada zona típica, estabelece-se para os Gabinetes uma temperatura interna de conforto da ordem dos 20ºC para o Inverno e 25ºC para o Verão, de acordo com o Projeto AVAC [16]. Para os Laboratórios, a temperatura de referência para o conforto é de 18ºC para o Inverno apesar de não existir condicionamento térmico e de 25ºC para o Verão. Para as Salas de Aula/Estudo 18ºC para o Inverno e 26ºC para o Verão.

Tabela 3.2 - Condições de projeto para a simulação Térmica do Edifício X.

Propriedade	Inverno	Verão
$T_{ext(ºC)}$(bolbo seco)	**3,5ºC**	**32ºC**
Hrel (%)	**80%**	**50%**

Tabela 3.3 - Temperatura de projeto por Zona.

Zona	T_{ref}(Inverno)	T_{ref}(Verão)
Gabinetes	**20ºC**	**25ºC**
Laboratórios	**18ºC**	**25ºC**
Salas de Aula/Estudo	**18ºC**	**26ºC**

A partir das temperaturas de projeto torna-se possível proceder à verificação do comportamento do sistema de climatização para dias típicos de Inverno e Verão, de modo a obter-se uma estimativa rápida relativamente à potência dimensionada para os equipamentos.

Teoricamente, as temperaturas de projeto devem ser estrategicamente definidas de modo a que a simulação das cargas internas cubra o pior caso possível. Deste modo, a não adequabilidade das temperaturas exteriores de projeto pode culminar num sub/sobre dimensionamento do sistema de climatização, no que respeita à potência calculada para os seus equipamentos de produção e locais. Nesse âmbito, a potência nominal dos equipamentos instalados deve ser ligeiramente superior à potência necessária para suportar as cargas internas máximas em cada período (Inverno e Verão). Essa margem de segurança deverá ser balanceada tendo em conta o risco inerente à existência de dias atípicos (muito quentes ou muito frios) com o custo adicional do equipamento.

3.3 Modelação do edifício

Para que se possa avaliar o desempenho energético do edifício é necessária a existência de um modelo energético do mesmo, que poderá ser implementado no próprio *software* de simulação (manualmente) ou a partir de um *software* de edição gráfica.

A modelação manual, além de ser um método mais grosseiro, impossibilita ou torna bastante mais difícil um nível de detalhe tão aprofundado como o da modelação gráfica, no que respeita às coordenadas exatas de cada superfície a definir. Além disso, do ponto de vista da engenharia, a conceção da estrutura base de um edifício a partir de um modelo gráfico corresponde à prática mais indicada.

Com base nesse pressuposto, procedeu-se à modelação da estrutura do edifício através de um software de edição gráfica, *Google SketchUp* , tendo como base as plantas, cortes e fachadas dos vários pisos, disponíveis através do *software AutoCAD.*

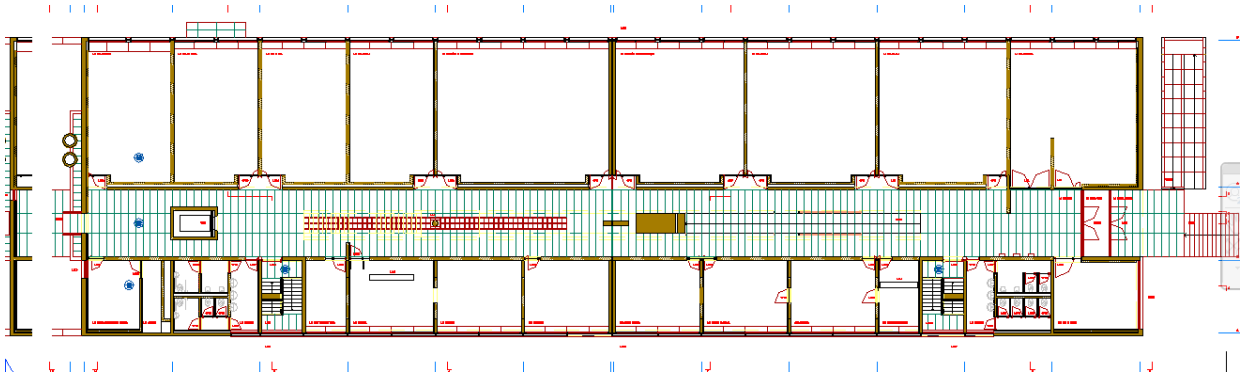


Figura 3.5 – Vista da planta do Piso 1 do *Edifício X* (*AutoCAD*).

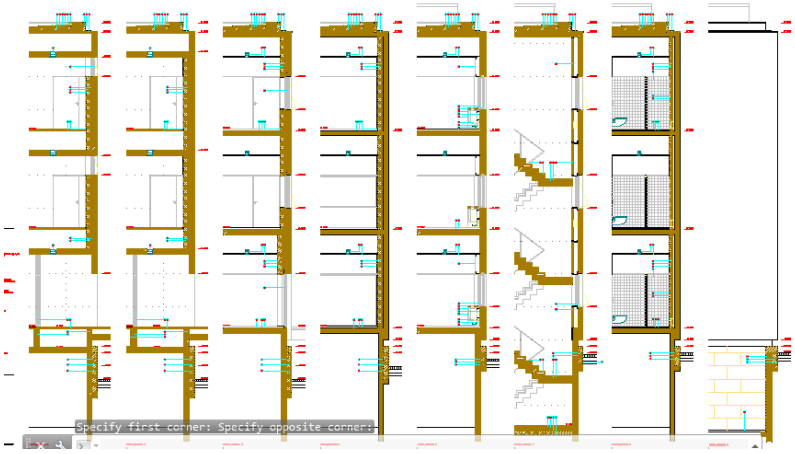


Figura 3.6 - Vista dos cortes das fachadas Norte e Nascente do *Edifício X* (*AutoCAD).*

Esta ferramenta é normalmente utilizada de forma mais recorrente noutro âmbito, nomeadamente através da projeção de edifícios naturalmente concebidos para fins arquitetónicos. Neste caso, porém, o objetivo não passa pela definição de um modelo arquitetónico simples, mas sim de um modelo energético que simule o comportamento do edifício, sob o ponto de vista térmico e energético.

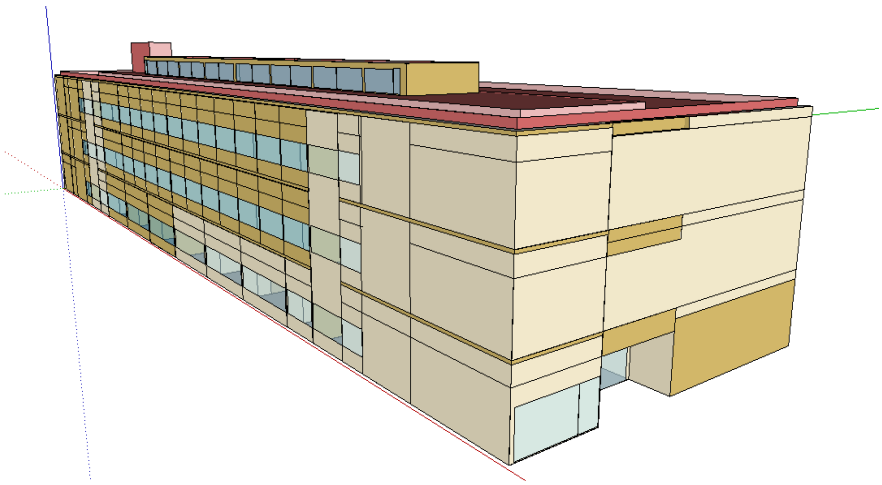


Figura 3.7 - Modelo gráfico do *Edifício X* (*Google SketchUp*).

O *software Google SketchUp* não suporta, por si só, a modelação simultânea das vertentes estrutural e térmica do edifício. Para que o modelo térmico seja criado e processado pelo *software* de simulação energética, torna-se necessária a aplicação de um *plug-in* de forma a permitir a implementação desse modelo no próprio *software* de edição gráfica, criando um ficheiro com essa informação disponível, compatível com o tipo de ficheiro suportável pelo software de simulação energética *EnergyPlus (.idf).* Para o efeito foi utilizado um programa

também concebido pelo DOE-USA, *OpenStudio,* especialmente desenvolvido para permitir a integração de modelos gráficos com o *EnergyPlus*.

A existência deste *plug-in* permite a definição das Zonas térmicas no próprio *Google SketchUp* e a definição do tipo de superfície de cada uma dessas zonas quanto à sua constituição física (materiais de construção) e condição fronteira (exterior, superfície, zona, solo).

O modelo energético, contrariamente ao arquitetónico, é projetado em 2D, uma vez que a espessura das superfícies é um dos fatores a ser editado no *EnergyPlus*.

3.3.1 Materiais de Construção e Superfícies do Edifício

Na primeira fase, a utilização do software gráfico *Google SketchUp* permite obter a estrutura física do edifício e transpor a informação relativa às coordenadas de cada superfície específica, bem como a sua orientação.No entanto, o comportamento energético só será simulado após uma definição minuciosa de todo o tipo de equipamentos que alimentam as diversas zonas, das cargas internas a que estas estão sujeitas, da interligação entre os vários equipamentos existentes. Nesta fase procedeu-se à estruturação dos vários tipos de superfície que constituem o edifício. O software *EnergyPlus* permite definir vários materiais de construção, através das suas propriedades térmicas.

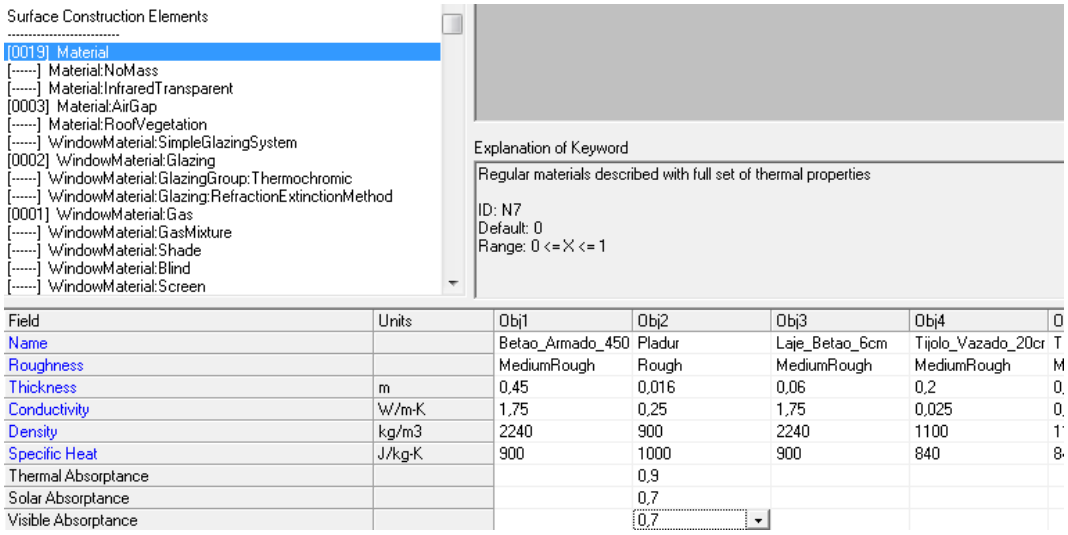


Figura 3.8 - Parametrização do tipo de materiais das superfícies (*EnergyPlus*).

As superfícies do edifício (paredes, teto, pavimento, etc.) são constituídas por uma ou mais camadas dispostas do exterior para o interior e onde cada uma delas representa um tipo de material. A informação relativa às plantas dos vários pisos, alçados e cortes, acedeu-se

recorrendo aos ficheiros AutoCAD (.dwg). A utilização destes ficheiros foi importante na fase inicial (modelação gráfica), uma vez que as plantas foram transpostas para o software *Google Sketchup* e a definição estrutural do edifício foi executada a partir delas.

Os ficheiros que contêm a informação relativa aos vários cortes e alçados permitiram obter uma visão mais pormenorizada do edifício através da definição da espessura das várias camadas e superfícies. Analisando cada tipo de material utilizado na construção, realizou-se uma lista das respetivas propriedades térmicas.

Tabela 3.4 - Tipos de material utilizado e respectivas propriedades térmicas.

Tipo de Material	Rugosidade	Espessura (cm)	k[12] (W/m.ºC)	ρ [13](kg/m3)	c [14](J /kg..K)
BA[15]- 300	Média	**30**	**1,75**	**2240**	**900**
BA[9]- 200	Média	**20**	**1,75**	**2240**	**900**
BA[9]-400 400	Média	**40**	**1,75**	**2240**	**900**
B[16]- 60	Média	**6**	**1,75**	**2240**	**900**
TV[17]- 70	Alta	**7**	**0,025**	**1100**	**840**
TV- 200	Alta	**20**	**0,025**	**1100**	**840**
TV- 110	Alta	**11**	**0,025**	**1100**	**840**
PE[18]- 40	Baixa	**4**	**0,035**	**35**	**1550**
PE- 30	Baixa	**3**	**0,035**	**35**	**1550**
P[19]	Alta	**1,6**	**0,25**	**900**	**1000**
M[20]	Baixa	**2,5**	**0,15**	**608**	**1630**
A[21]	Média	**2**	**1,15**	**2000**	**1550**
G[22]	Média	**5**	**0,7**	**2000**	**1000**
Ge[23]	Média	**1**	**0,35**	**800**	**836**

Após a definição dos materiais, foram criados os vários tipos de superfície presentes no edifício, organizadas por camadas.

[12] Condutividade térmica
[13] Densidade
[14] Calor específico
[15] Betão Armado
[16] Betonilha
[17] Tijolo Vazado
[18] Poliestireno extrudido
[19] Pladur
[20] Madeira
[21] Argamassa/Cimento
[22] Godo
[23] Reboco de gesso

Tabela 3.5 - Tipos de superfície do Edifício e respetiva composição.

Tipo de superfície	Camada 1	Camada 2	Camada3	Camada 4	Camada 5
Cobertura Centro e Nascente	G	PE-40	BA-200	G	
Cobertura Poente	G	PE-40	BA-400	G	
Alçados Norte e Sul - P1	BA-300	A	CA[24]-2	PE-30	TV-70
Alçados Norte e Sul - P2 e P3	BA-200	A	CA[25]-4	PE-30	TV-110
Alçado Nascente	BA-200	PE-40			
Alçado Poente	BA-300	PE-40			
Parede Interior Betão	BA-200				
Parede Interior Tijolo	TV-200				
Pavimento Nascente/Poente	A-5				
Pavimento Central	B-60				
Pavimento Piso1 Poente	PE-30	A-2			
Parede Interior WC	PE-40	TV-70			

Referenciando a tabela anterior, existem vários tipos de parede em todo o edifício, constituídas por diferentes materiais. Conforme seria de esperar, as paredes exteriores que constituem a envolvente externa apresentam uma espessura maior e são constituídas por materiais isolantes que permitem reduzir as trocas de calor com o exterior. Em contrapartida, as paredes que separam as várias zonas interiores do edifício são formadas por uma camada simples, de betão ou tijolo vazado e de espessura menor, não lhes sendo aplicado qualquer isolamento térmico. De facto, as paredes interiores funcionam mais como estrutura de suporte e a sua conceção não passa tanto pela redução das transferências de calor. Essa opção está relacionada com o facto de não existirem grandes variações de temperatura entre zonas adjacentes, ao longo das várias fachadas do edifício uma vez que a regulação termostática pressupõe uma temperatura homogénea para zonas adjacentes em cada fachada.

As paredes internas dividem duas zonas adjacentes e funcionam como superfície de transição (multi-zona), uma vez que são partilhadas por duas zonas. Assim, existem ligeiras variações entre as extremidades exterior e interior de uma parede interna, pois cada zona regista a sua própria temperatura instantânea.

No entanto, o calor que é transferido por condução da zona mais quente para a mais fria é pouco relevante para o balanço térmico pois as grandes perdas dão-se através das superfícies da envolvente externa. De facto, é através das paredes e janelas em contacto com o exterior que se registam as maiores perdas/ganhos térmicos num edifício. Tendo em consideração

[24] Caixa-de-ar (20mm)
[25] Caixa-de-ar (40mm)

esse facto, surgiu a necessidade de se construírem paredes sólidas capazes não só de resistir aos desgastes físicos provocados por fenómenos atmosféricos (chuva,ventos fortes), mas também de responder às condicionantes impostas pelas exigências de conforto térmico dos ocupantes, que se manifestam particularmente nos dias muito quentes de Verão ou muito frios de Inverno.

Para esse efeito, foram utilizados materiais próprios para um bom isolamento, tais como o poliestireno ou o gesso, cujos coeficientes de condutibilidade térmica são bastante baixos, criando com isso boas resistências térmicas ao fluxo de calor. Por outro lado, a solidez e robustez das paredes exteriores é conseguida por meio da aplicação das camadas de betão, que apresentam uma enorme capacidade de resistência às intempéries climatéricas, apesar de não serem boas alternativas como isolantes. O tijolo vazado funciona como camada complementar ao betão e, não sendo tão resistente e robusto como este, possui características que permitem um isolamento razoável, ainda que bastante menos acentuado do que o dos materiais isolantes próprios para o efeito. As zonas localizadas nos três pisos do alçado nascente possuem um teto falso e o seu pé direito (2,75m) é inferior ao do alçado poente (3,25m). O teto falso é constituído por placas de gesso cartonado, correntemente designado de *pladur*. Este material é especialmente recorrente em aplicações onde se pretende construir superfícies flexíveis a possíveis alterações futuras, de fácil manutenção, menor espessura e a um preço relativamente baixo. Os tetos falsos em *pladur* são bastante utilizados hoje em dia, pelo facto de permitirem no seu interior a instalação dos sistemas de abastecimento e distribuição de ar condicionado, tais como condutas de água ou de ar, ao contrário do que acontece com os tectos de betão ou tijolo. Um dos problemas que pode decorrer da aplicação de tectos falsos em *pladur* é o aparecimento de humidades, especialmente em zonas que possuam essa tendência. As paredes exteriores dos alçados norte e sul possuem uma maior resistência térmica pois são constituídas por um maior número de camadas (betão, tijolo, poliestireno) e possuem uma caixa de ar intermédia, que contribui bastante (mais ainda que um material isolante) para o isolamento térmico tendo em conta que o ar possui um coeficiente de condutibilidade térmica bastante baixo.

O sucesso obtido na projecção e concepção de um edifício em termos de conforto térmico e desempenho energético reside bastante na orientação escolhida para as janelas ao longo das fachadas e no tipo de vidro utilizado na sua constituição. Actualmente, o recurso a vidros duplos incolores é cada vez maior e as suas vantagens reflectem-se não apenas do ponto de vista térmico, mas também acústico.

Na projeção do edifício foram utilizados dois tipos de janela. Os alçados poente e nascente (zona dos gabinetes e laboratórios) possuem janelas de vidro duplo incolor. Os alçados norte e sul possuem janelas do tipo simples refletante.

Tabela 3.6 - Constituição dos envidraçados do Edifício.

Alçados	Tipo de vidro	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Norte e Sul	**Refletante simples**	Vidro simples refletante 3mm			
Nascente Poente	**Duplo incolor**	Vidro simples incolor 3mm	Ar 6mm	Vidro simples incolor 3mm	Grelha alumínio

Os vidros reflectantes possuem a vantagem de, nos meses quentes de Verão, reflectirem grande parte da radiação incidente e como tal, reduzirem a transmissão de calor sob a forma de radiação para os espaços interiores. No entanto, a aplicação de vidros duplos é bastante mais proveitosa no que respeita a poupanças energéticas, tendo em conta que a resistência térmica provocada por este tipo de vidros é extremamente superior à dos vidros simples. No Inverno, os espaços sujeitos a aquecimento que possuem janelas de vidro duplo são bastante menos sensíveis a perdas de calor em relação a espaços envolvidos com janelas de vidros simples e, como tal, exigem um menor consumo aos seus sistemas de climatização. Essa vantagem pode ser explicada a partir dos processos que envolvem a transferência de calor. Na troca de calor entre o ar interior de um espaço aquecido e o ar exterior através de uma janela de vidros simples existe convecção, inicialmente entre o ar quente e a superfície interna da janela e, posteriormente, entre a superfície externa da janela e o ar exterior. A taxa de calor transferido é tanto maior quanto maior for o coeficiente de convecção nas envolventes (interna e externa) da janela. Numa situação semelhante em que se está na presença de uma janela de vidro duplo, o fluxo de calor encontra outras barreiras além dos dois processos de convecção. Em primeiro lugar, o processo de convecção ocorre de forma semelhante ao anteriormente descrito, para o vidro mais próximo do espaço interior. Posteriormente, o fluxo de calor terá de atravessar por condução o gás que se encontra entre os dois vidros e cuja resistência térmica é bastante elevada. Finalmente, o fluxo de calor terá de transitar do espaço entre os dois vidros para o vidro externo e deste para o exterior, existindo novamente dois processos de convecção. Esta sequência de processos inibe bastante a transferência de energia térmica e, consequentemente, reduz a sua intensidade.

A aplicação de vidros duplos no Verão permite que a transferência de calor por radiação do exterior para o interior seja reduzida. A sua aplicação nesta época do ano é bastante importante pois a energia solar incidente é elevada e mantém-se ao longo de várias horas. Para obter uma maior proteção solar no Verão, foram aplicados materiais de sombreamento ao longo das fachadas poente e nascente. Os vãos verticais estão protegidos com uma grelha de alumínio termolacado com poliuretano que garante o sombreamento quase total nos meses quentes.

3.3.2 Cargas Internas e Período de Funcionamento

No cálculo do balanço energético de uma determinada zona figuram, não apenas as trocas de calor devido às diferenças de temperatura entre envolvente exterior e espaços interiores, mas também outros ganhos internos que influenciam as condições termo-higrométricas do espaço, bem como o seu consumo energético. Assim, no projecto de climatização de um edifício devem constar os ganhos internos das várias zonas a climatizar, tais como o calor libertado pelos seus ocupantes ou pelos sistemas de iluminação e equipamentos eléctricos instalados.

As cargas internas variam bastante de edifício para edifício. Efetivamente, existem edifícios onde o número de pessoas ou de equipamentos elétricos por metro quadrado é elevado e outros que nem tanto. Por outro lado, existem edifícios que além de possuírem uma orientação solar favorecedora, estão equipados com materiais que permitem bons aproveitamentos solares ao longo do ano, dispensando a luz artificial em longos períodos do seu funcionamento (sistemas solares passivos).

Além de variarem de edifício para edifício, registam-se também grandes variações das cargas internas de um edifício ao longo do tempo (do dia ou do ano). Nos edifícios de serviços, principalmente, podem-se registar períodos de grande pico e outros em que praticamente os ganhos internos são insignificantes.

Como edifício de serviço que é, o edifício em estudo não está imune às variações de carga interna que se faz sentir ao longo de um dia.

No *EnergyPlus* as cargas internas são definidas individualmente por zona e são consideradas de acordo com o seu tipo (ocupação, iluminação, equipamento elétrico).

3.3.3 Ocupação

O *EnergyPlus* permite a parametrização dos níveis de ocupação do Edifício através de um *layout* onde são configurados os principais indicadores para o cálculo das cargas internas por ocupação, sendo 1) o método de cálculo de ocupação, 2) o número de ocupantes por zona/m2, 3) a quantidade de calor libertada pelos corpos e 4) a percentagem de radiação emitida pelos corpos.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Gab1.26_People	Biblio_People
Zone Name		Gab1.26	Biblioteca
Number of People Schedule Name		Ocupacao	Ocupacao
Number of People Calculation Method		People	People
Number of People		1	16
People per Zone Floor Area	person/m2		
Zone Floor Area per Person	m2/person		
Fraction Radiant		0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		ActSchd	ActSchd
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		Yes	Yes
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged	ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name			
Work Efficiency Schedule Name			
Clothing Insulation Schedule Name			
Air Velocity Schedule Name			
Thermal Comfort Model 1 Type			
Thermal Comfort Model 2 Type			
Thermal Comfort Model 3 Type			

Figura 3.9 - Parametrização de cargas internas por ocupação *(EnergyPlus)*.

No modelo, é estabelecido um horário de ocupação para as várias zonas. Para isso, a ocupação de um espaço pode ser definida de acordo com um valor de referência que representa o número máximo de pessoas nesse espaço. O horário definido faz a gestão da ocupação dos espaços tendo como base esse valor máximo, que corresponde ao valor de pico nos períodos de maior atividade. O valor de referência pode ser um valor absoluto (número de pessoas na zona), ou relativo (número de pessoas por metro quadrado). Neste caso, os critérios adotados na implementação do projeto AVAC do edifício [16] consideraram a primeira solução e , consequentemente, a modelação do edifício seguiu esse procedimento.

O nível de ocupação de um edifício de ensino é um fator difícil de prever ou dimensionar, mas pode ser aproximado.O RSECE indica numa tabela os valores horários de referência para a carga de ocupação em função da ocupação máxima de uma zona/espaço de um edifício de ensino[26] [34]. No entanto, poderá existir uma dispersão considerável entre vários edifícios deste tipo, sendo que o melhor procedimento seria modelar de acordo com dados históricos de ocupação. Tendo em conta que o acesso a esses dados não está disponível na maioria dos edifícios e particularmente neste edifício uma vez que não existe controlo de acesso, cabe ao utilizador fazer uma análise crítica e definir ao seu critério quais os níveis de ocupação mais rigorosos.

No caso concreto, tendo em conta o anteriormente exposto, decidiu-se considerar as indicações do RSECE.

[26] Anexo I – tabela I

Deste modo, considerou-se uma ocupação perto da ocupação máxima do edifício se entre as 08h e as 12h da parte da manhã (a oscilar entre os 80% e 100%) e das 14h às 18h parte da tarde (oscilando entre 50% e 100%) e períodos de maior vazio durante as horas de almoço (entre as 12h e as 14h) e nas horas de fim de tarde onde o número de aulas é bastante reduzido (10% de ocupação entre as 18h e as 20h). Estes valores são considerados apenas para os dias de semana, uma vez que o edifício não se encontra em funcionamento durante os fins de semana.

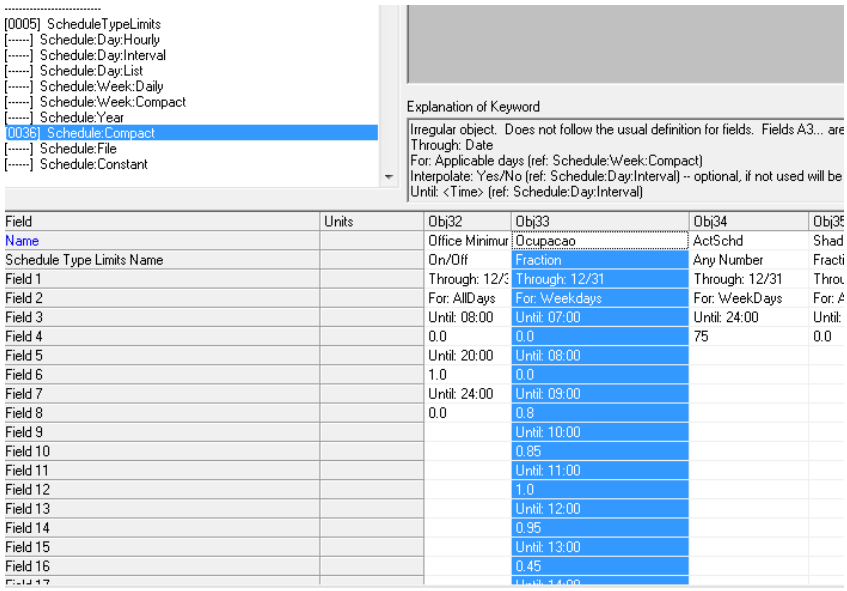


Figura 3.10 - Parametrização dos níveis de ocupação horária do Edifício X.

Convém salientar que, na modelação do regime de ocupação/funcionamento do edifício teve-se em consideração um regime constante ao longo do ano, excluindo-se apenas os fins de semana. Este tipo de análise resulta de uma abordagem mais simplificada e não considera o funcionamento letivo da própria instituição de ensino. Nesse caso, seriam excluídos da simulação períodos de férias académicas, existentes na pausa entre semestres que teriam lugar parcialmente durante os meses de Dezembro/Janeiro/Fevereiro/Março e totalmente no mês de Agosto.

Um dos parâmetros a ser definido é a fração de energia radiante emitida pelos corpos, que se considerou ser 30% do total de calor sensível libertado. O restante é libertado por condução e convecção. Outro parâmetro que o *EnergyPlus* permite definir é a percentagem de calor sensível libertado, face à quantidade total, podendo este ser calculado pelo próprio *software* ou pré-definido pelo utilizador.

Além disso, é definido um horário correspondente ao tipo de atividade dos ocupantes e que contém a taxa de calor que cada um deles liberta (W/ ocupante). Parte dessa energia é latente, alojando-se apenas no próprio corpo que o liberta. Neste caso, considerou-se que o fluxo de

calor sensível libertado é de 65 W/ocupante [16], o mesmo valor para o calor latente. Estes valores são os considerados para o cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento iniciais do projeto de execução e estão de acordo com as indicações do próprio manual do *EnergyPlus.*

O Projeto do Edifício [16] referencia os níveis de ocupação máxima para cada zona em concreto[27], tendo sido implementados no modelo.

3.3.4 Iluminação

A iluminação artificial pode ser definida e controlada através do software *EnergyPlus*. Cada zona tem a si associado um horário de iluminação que, tal como no caso anterior, permite especificar a potência elétrica exigida em cada instante. O horário funciona também com um valor de referência que pode ter por base um valor absoluto ou ser normalizado por área ou por ocupante. No projeto AVAC, esses valores vêm disponibilizados por m^2 equivalente, ou seja, Potência eléctrica máxima consumida pelas lâmpadas por unidade de área (W/m^2). A Potência elétrica consumida pelas lâmpadas é transformada uma parte em radiação térmica e a restante em radiação visível. O seu propósito é produzir luz e, como tal, o seu rendimento aumenta maximizando-se a emissão de radiação visível (comprimento de onda curto) e minimizando-se a emissão de radiação térmica (elevado comprimento de onda).

Efetivamente, grande parte da energia é libertada sob a forma de calor e, tal como acontece com as restantes cargas internas, os balanços internos das zonas são influenciados. O *EnergyPlus* permite estipular a fração de energia que é libertada sob a forma de radiação térmica, radiação visível ou ainda por convecção. Caso não se tenha acesso a esses valores por parte do fabricante, o *software* indica numa tabela os valores típicos de acordo com o tipo de instalação da luminária.

[27] Ver Anexo II – Número de ocupantes por zona

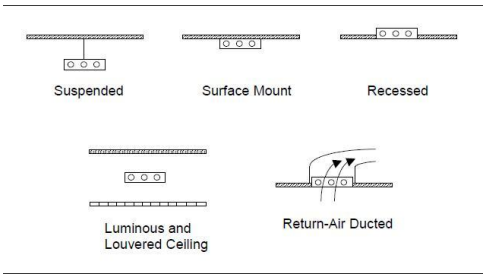


Figura 3.11 - Tipo de luminárias existentes [13].

Se a luminárias estiverem instaladas junto ao nó de saída da zona (ar de retorno), parte ou a totalidade da energia emitida pelas lâmpadas perde-se pela conduta de retorno do ar e não fica acumulada na zona.

Field Name	Luminaire Configuration, Fluorescent Lighting				
	Suspended	Surface mount	Recessed	Luminous and louvered ceiling	Return-air ducted
Return Air Fraction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.54
Fraction Radiant	0.42	0.72	0.37	0.37	0.18
Fraction Visible	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
$f_{convected}$	*0.40*	*0.10*	*0.45*	*0.45*	*0.10*

Figura 3.12 - Características das luminárias [13].

Os valores admitidos para as frações de radiação térmica e radiação visível foram os adotados pelo *software* para sistemas de iluminação nos quais as luminárias se encontram montadas junto ao teto (*surface mount*), coerente com a realidade nas várias zonas do Edifício. Como se vê pela tabela, cerca de 72% da energia emitida pelas lâmpadas fluorescentes é de origem térmica e apenas 18% é luz. Os restantes 10% correspondem à energia libertada por convecção.

As lâmpadas instaladas nas várias zonas do edifício são do tipo fluorescente e apresentam uma potência unitária de 60W. No projeto de execução foi feito o estudo sobre a potência instalada em cada espaço e considerou-se que a potência máxima de iluminação para os Laboratórios e Salas de Aula/Estudo seria de 15 W/m^2 e para os gabinetes e áreas técnicas de 10 W/m^2. Assim sendo, esses são os valores de referência máximos utilizados no horário de funcionamento dos sistemas de iluminação.

[0070] Lights
[0064] ElectricEquipment
[------] GasEquipment
[------] HotWaterEquipment
[------] SteamEquipment
[------] OtherEquipment
[------] ZoneBaseboard:OutdoorTemperatureControlled

Daylighting

Explanation of Keyword

Sets internal gains for lights in the zone.

ID: N2
No default value available
Range: 0 <= X but no maximum

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Reprografia_Lights	Sala1.21_Lights	Gab_PCDEE_Lights
Zone Name		Reprografia	Sala1.21	Gab_PCDEE
Schedule Name		Iluminacao	Iluminacao	Iluminacao
Design Level Calculation Method		Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area
Lighting Level	W			
Watts per Zone Floor Area	W/m2	10	15	10
Watts per Person	W/person			
Return Air Fraction		0	0	0
Fraction Radiant		0	0	0
Fraction Visible		0	0	0
Fraction Replaceable		1	1	1
End-Use Subcategory		General	General	General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperatur		No	No	No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co				
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co	1/K			

Figura 3.13 - Parametrização dos níveis de Iluminação do Edifício X.

Tal como ocorre com a carga de ocupação, a carga de iluminação é controlada por um horário pré-estabelecido. De igual forma, o RSECE disponibiliza valores *standard* para iluminação horária em edifícios de ensino. Esses valores foram mais uma vez alvo de uma análise crítica de forma a comprovar a sua coerência com as cargas reais.

[------] Schedule:Day:Interval
[------] Schedule:Day:List
[------] Schedule:Week:Daily
[------] Schedule:Week:Compact
[------] Schedule:Year
[036] Schedule:Compact

Explanation of Keyword

Irregular object. Does not follow the usual definition for fields.
Through: Date
For: Applicable days (ref: Schedule:Week:Compact)
Interpolate: Yes/No (ref: Schedule:Day:Interval) -- optional, if n
Until: <Time> (ref: Schedule:Day:Interval)

ield	Units	Obj1	Obj2	Obj3
ame		Iluminacao	Equipamentos Elect	Winter Schedule
chedule Type Limits Name		Fraction	Fraction	On/Off
ield 1		Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 3/31
ield 2		For: Weekdays	For: Weekdays	For: WeekDays
ield 3		Until: 07:00	Until: 07:00	Until: 08:00
ield 4		0.0	0.0	0.0
ield 5		Until: 08:00	Until: 08:00	Until: 20:00
ield 6		0.1	0.0	1.0
ield 7		Until: 09:00	Until: 09:00	Until: 24:00
ield 8		0.85	0.4	0.0
ield 9		Until: 10:00	Until: 10:00	Through: 9/30
ield 10		0.90	0.5	For: WeekDays
ield 11		Until: 11:00	Until: 11:00	Until: 24:00
ield 12		1.0	0.5	0.0
ield 13		Until: 12:00	Until: 12:00	Through: 12/31
ield 14		0.95	0.5	For: WeekDays
ield 15		Until: 13:00	Until: 13:00	Until: 08:00
ield 16		0.45	0.3	0.0

Figura 3.14 - Parametrização da carga horária de Iluminação do Edifício X

Os valores indicados no RSECE indicam cargas elevadas de iluminação artificial distribuídas de forma semelhante às cargas de ocupação e que coincidem com períodos do dia em que a luminosidade natural é substancial. Esses valores vão ao encontro das práticas atuais decorrentes no edifício em estudo, onde a luminosidade natural é pouco aproveitada, pelo que foram adotados e incluídos no modelo.

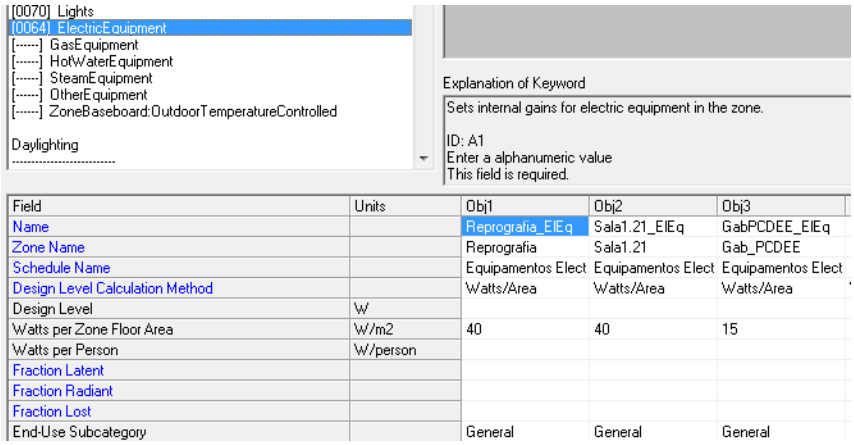
3.3.5 Equipamentos Elétricos

As cargas internas devidas a equipamentos elétricos podem ser igualmente parametrizadas no software. No caso concreto, considerou-se os valores de potência normalizada por área de superfície, como indicado no Projeto de Execução do edifício, com os seguintes valores por tipo de zona:

(i) Gabinetes: 15 $W/_{m^2}$

(ii) Laboratórios: 60 $W/_{m^2}$

(iii) Salas de Apoio e Bar: 40 $W/_{m^2}$



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Reprografia_ElEq	Sala1.21_ElEq	GabPCDEE_ElEq
Zone Name		Reprografia	Sala1.21	Gab_PCDEE
Schedule Name		Equipamentos Elect	Equipamentos Elect	Equipamentos Elect
Design Level Calculation Method		Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area
Design Level	W			
Watts per Zone Floor Area	W/m2	40	40	15
Watts per Person	W/person			
Fraction Latent				
Fraction Radiant				
Fraction Lost				
End-Use Subcategory		General	General	General

Figura 3.15 - Parametrização da carga máxima devida a Equipamentos Elétricos

O horário de utilização dos equipamentos em função da sua carga nominal é definido no RSECE com o mesmo fator de utilização das cargas de iluminação. No entanto, adotou-se um critério mais restritivo e realista com valores de carga inferiores, considerando-se os períodos de pico de utilização não excedentes a 50% da carga nominal máxima.

3.3.6 Sistemas de Produção e Distribuição

A distribuição dos fluidos quente e frio às unidades terminais é feita através de um sistema a dois tubos, o que não permite o arrefecimento e aquecimento simultâneo das zonas a climatizar. Os sistemas de preparação de água quente e fria são independentes e a permuta destes para os sistemas de distribuição é feita através de um permutador de placas [16].

3.3.6.1 Produção e Distribuição de Frio

O arrefecimento ambiente é assegurado de modo centralizado através da distribuição de água refrigerada aos equipamentos locais (ventilo-convetores), preparada com base num *chiller* de compressão elétrica do tipo ar/água , situado na cobertura do edifício.

O sistema de condensação é efetuado sob a forma de ventilação forçada, através da insuflação de ar exterior a uma temperatura pré-definida. A permuta de calor é feita entre ar frio e fluido circulante, onde este é arrefecido até à temperatura de referência e distribuído aos sistemas locais através dos sistemas de distribuição (condutas e bombas).

As características do *chiller* são as seguintes[28]:

(i) Evaporador de expansão direta, multi-tubular horizontal termicamente isolado com prancha de borracha sintética ;
(ii) Condensador arrefecido a ar, tipo bateria alhetada com ventiladores axiais para circulação forçada do ar;
(iii) Componentes do circuito refrigerante, onde se inclui absorvedor de ruído, válvula de corte, válvula de retenção, filtro secador e válvula de expansão termostática

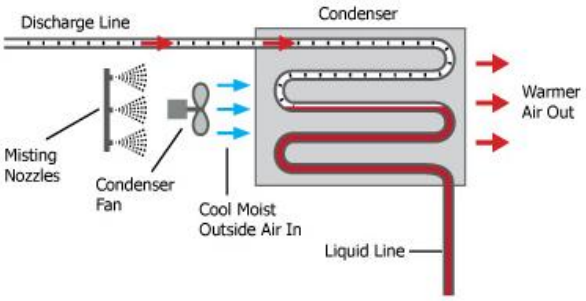


Figura 3.16 - Esquema-tipo de um condensador a ar.

As temperaturas *standard* de funcionamento do *chiller* são de 7ºC no circuito de ida (*chiller* → Instalação) e 12ºC no circuito de retorno (Instalação → *chiller*). O *EnergyPlus* permite definir várias configurações de *chiller* e, especificamente, nos *chillers* elétricos permite definir um equipamento catalogado com um COP pré-definido.

Apesar de indicar as características do *chiller* a instalar, o Projeto de Execução não faz referência a nenhum fabricante em concreto nem a um valor de COP.

[28] *(Eng. Rodrigues Gomes & Associados - Consultores de Instalações Especiais LDA s.d.)*

Todavia, sabe-se que o Edifício tem instalado um *chiller* Lennox MCM242, referenciando o estudo de *Santos* [35]. No caso concreto, não tendo sido possível encontrar qualquer referência ao modelo de *chiller* em questão, considerou-se um valor COP=3 como *standard,* tendo em conta o *benchmarking* feito a várias marcas deste tipo de *chillers*, onde se inclui o catálogo da Lennox.

Em termos práticos, variações neste coeficiente refletem-se em variações no consumo elétrico do equipamento, sendo tanto maior quanto menor for o valor do COP.

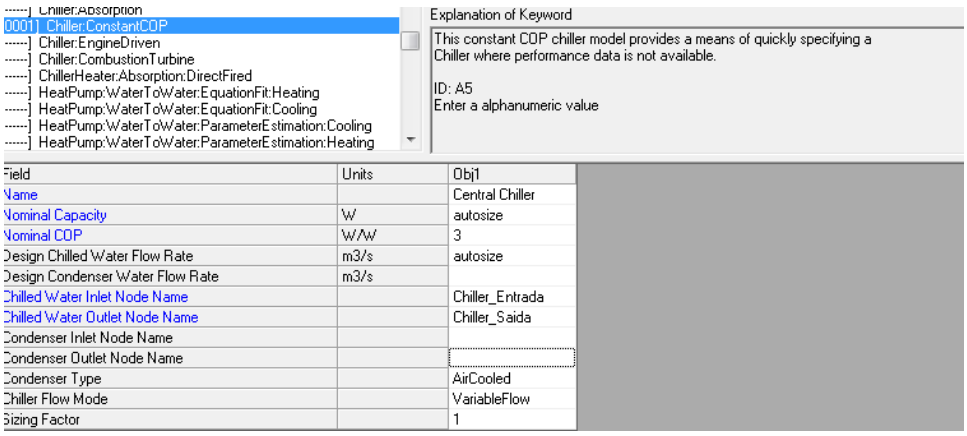


Figura 3.17 - Parametrização do tipo de chiller utilizado.

Tanto a capacidade nominal (W) como o caudal máximo de água refrigerada ($m^3/_s$) foram auto dimensionados para a carga máxima pedida ao *chiller.* Definiu-se o tipo de caudal como variável tendo em conta que as cargas internas não são constantes e, como tal, as necessidades de arrefecimento variam. Outro dos parâmetros corresponde ao tipo de condensador, existindo a possibilidade de definir equipamentos do tipo ar/água ou água/água. Neste último caso, que não se aplica nesta simulação, seria necessário incorporar no modelo uma torre de refrigeração, tornando o processo infraestrutural bastante mais complexo na prática.

A distribuição da água refrigerada é feita a partir de condutas através de bombas alimentadas eletricamente. O *EnergyPlus* não permite a modelação de sistemas de distribuição a dois tubos como se perspetiva no Projeto de Execução, sendo a distribuição de água quente e fria independente, a partir de dois sistemas de condutas cada um deles ligado à fonte de produção respetiva, i.e sistema a quatro tubos.Deste modo, as redes de produção e distribuição de frio e calor *(Plant Loop*) são modeladas de forma autónoma, numa estrutura sequencial entre a fonte produtora e a fonte consumidora.

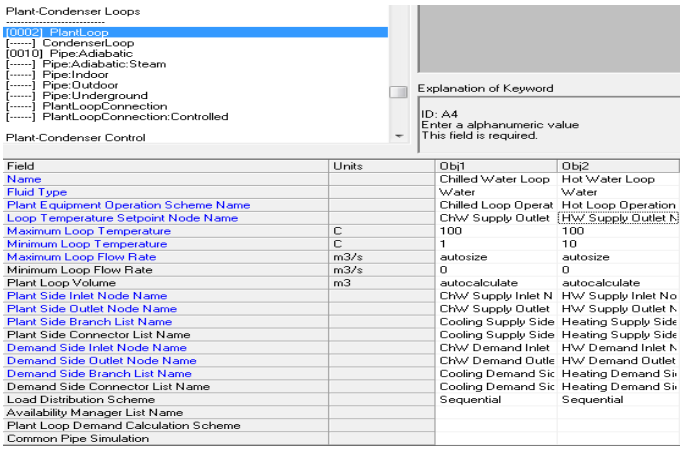


Figura 3.18 - Parametrização dos Sistemas de distribuição de água quente e fria (EnergyPlus).

No caso do sistema de distribuição de água refrigerada, o *chiller* é o equipamento de fornecimento - *Plant Side* - cujos nós terminais estão associados às tubagens de entrada e saída.

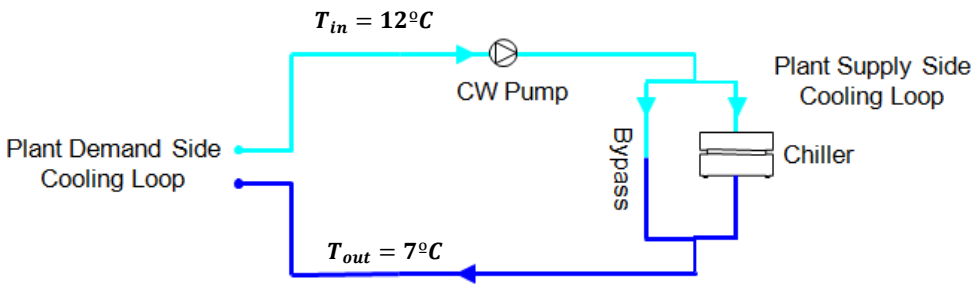


Figura 3.19 - Esquema do Sistema de distribuição de água fria no EnergyPlus [39].

A bomba eléctrica está a montante do *chiller* e funciona de modo intermitente (ON/OFF) consoante as cargas instantâneas. A válvula de *bypass* em paralelo com o *chiller* está ON sempre que a bomba esteja em funcionamento e o *chiller* esteja OFF, de modo a que o fluido não passe através deste, por questões de segurança do equipamento.

Figura 3.20 - Esquema de Arrefecimento das unidades Fan Coil do EnergyPlus [39].

Os equipamentos locais dos vários espaços, ventilo-convetores, são alimentados com água refrigerada que vem do circuito de frio a uma temperatura de referência (T_{in}=7ºC). O fluido alimenta as baterias por onde passa o ar a ser insuflado nos espaços e retorna ao circuito a uma temperatura superior resultante da permuta (T_{out} ≈ 12ºC).

3.3.6.2 Produção e Distribuição de Calor

O aquecimento ambiente do edifício é assegurado através da distribuição de água quente às várias unidades terminais, sendo esse aquecimento feito a partir da queima de gás propano, que tem lugar no queimador de uma caldeira.

Marca	Aplicações	ε_t[29]	Potência	T_{saida}	$T_{saida,max}$	Pressão
Roca	Média/Grande dimensão	90%	261 kW	80ºC	90ºC	PN5

Figura 3.21 - Características da Caldeira para preparação de água quente de acordo com o Projeto de Execução [16].

Existe uma acumulação tampão de água quente com uma capacidade suficiente para garantir o abastecimento instantâneo das cargas de aquecimento do edifício e permitir com isso um ciclo de funcionamento do queimador suficientemente duradouro de forma a obter-se um bom rendimento durante o processo da queima.

A distribuição é feita a partir de três prumadas, cada uma servindo parte do edifício:

(i) **Fachada Nascente** (Zona dos gabinetes)

(ii) **Fachada Poente** (Zona dos laboratórios)

(iii) **Cobertura** (UTAN e VE)

O *EnergyPlus* permite definir várias fontes de produção de calor, entre as quais uma caldeira a produzir água quente, alimentada por diversos tipos de combustível. No caso concreto, recorre-se ao gás propano, tal como a caldeira instalada no edifício, tendo-se considerado uma eficiência global de 90%, conforme as especificações do Projeto [16].

[29] Eficiência térmica (%)

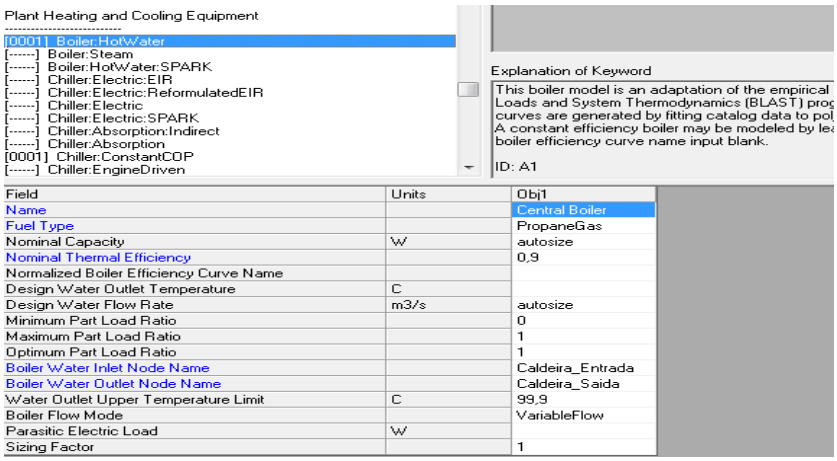


Figura 3.22 -Parametrização em EnergyPlus do tipo de Caldeira utilizada.

A rede de distribuição de água quente foi modelada individualmente, para efeitos de simulação, apesar de na instalação real ser conjunta com a rede de frio. Existe uma eletrobomba a montante da caldeira e uma válvula de *bypass* com o mesmo efeito da que existe no *chiller*. O caudal nominal do circuito de preparação é auto dimensionável pelo *software*, bem como a capacidade nominal da caldeira (kW), ambos modeláveis em função da carga máxima instantânea.

A água aquecida circula pela conduta de saída no circuito primário (produção) a uma temperatura de referência de T_{out}=80ºC (nunca excedendo os 90ºC) , dando-se a permuta com o fluido circulante no sistema secundário que será distribuído aos sistemas locais às condições- padrão (≈ 65ºC) através da regulação de uma válvula de 3 vias . O retorno deverá ser feito a uma temperatura um pouco mais baixa, T_{in}≈ 60ºC, de acordo com as especificações do Projeto de Execução [16].

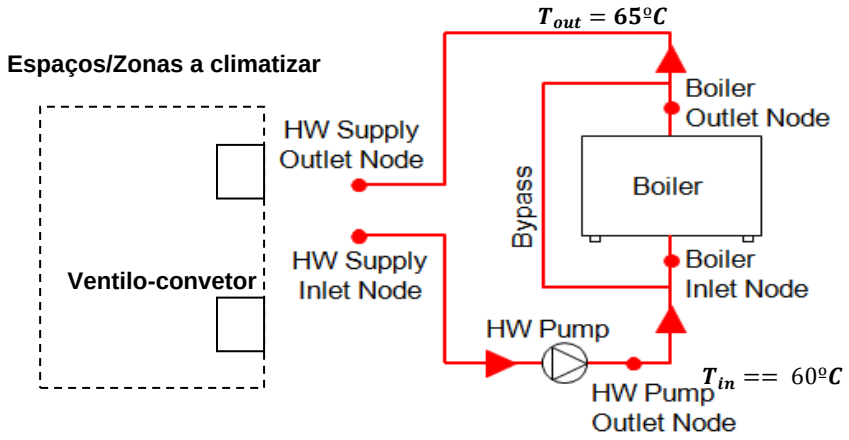


Figura 3.23 - Esquema do Sistema de distribuição de água quente no EnergyPlus [39].

A distribuição às várias zonas é modelada através de derivações *splitter,* sendo feita em paralelo para as várias unidades. No retorno, o caudal de saída das várias unidades culmina na tubagem principal que faz a ligação à unidade produtora, onde a água será reaquecida. Este tipo de distribuição garante que todas as unidades terminais estão a ser alimentadas nas mesmas condições, existindo apenas um circuito de distribuição com derivações locais.

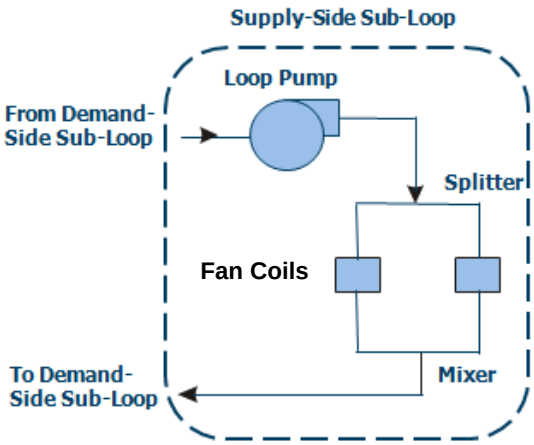


Figura 3.24 - Esquema em EnergyPlus da distribuição de água às unidades terminais de consumo [39].

A produção e distribuição de água quente e fria é coordenada a partir de horários que definem o seu período de funcionamento. A sobreposição dos horários de funcionamento para produção centralizada e distribuição loca deve ser efetiva, possibilitando que os equipamentos locais ventilo-convetores funcionem corretamente durante o período em que estão a ser alimentados (sincronização *supply/demand)*.

Definiu-se que período de disponibilidade para as redes de frio e calor cobre todo o período activo do edifício, garantindo-se assim que o *chiller* e a caldeira se encontram disponíveis para operar sempre que as cargas o exijam, consoante as necessidades instantâneas de aquecimento/arrefecimento local. Na simulação, tendo em conta que apenas é possível modelar um sistema de distribuição a 4 tubos, o processo de *switch* entre produção de frio e calor torna-se bastante mais flexível e eficaz que nos sistemas a 2 tubos, como ocorre na instalação real.

3.3.7 Sistemas de Condicionamento Local

Os sistemas de condicionamento térmico local do Edifício são sistemas a ar (ventilo-convetores) distribuídos pelas várias zonas, sendo aos seus terminais que é feita a distribuição do caudal de água fria/quente que vai permutar com o ar a ser insuflado no espaço a climatizar.

Existem cinco diferentes tipos de ventilo-convetor instalados nos vários espaços do edifício, variando em caudal e potência nominal, tipo de insuflação (superior/frontal) e retoma (anterior/inferior) de ar. Essas diferenças não foram consideradas na simulação, uma vez que o *EnergyPlus* dispõe apenas de um modelo *standard* de *FanCoil*. Os ventilo-convetores instalados nas zonas da fachada poente possuem apenas uma bateria para água arrefecida, ao contrário dos restantes. Todos os equipamentos estão equipados com filtro de ar para insuflação.

De acordo com o Projeto [16], o caudal nominal dos vários ventilo-convetores varia entre os 250 e os 675 m^3/h e a sua potência nominal entre os 870 W e 4000 W para aquecimento e 1300 W e 5090 W para arrefecimento. O regime de funcionamento das baterias corresponde a 65ºC (ΔT=5ºC) para a água quente e 7ºC (ΔT=5ºC) para a água refrigerada. No *EnergyPlus,* o objeto que representa o ventilo-convetor, *FourPipe:FanCoil,* funciona num sistema de distribuição a quatro tubos e abrange quatro unidades internas dispostas sequencialmente e parametrizáveis – a) Permutador entre ar novo exterior e ar de exaustão, b) Bateria de arrefecimento, c) Bateria de aquecimento e 4) Ventilador de insuflação.

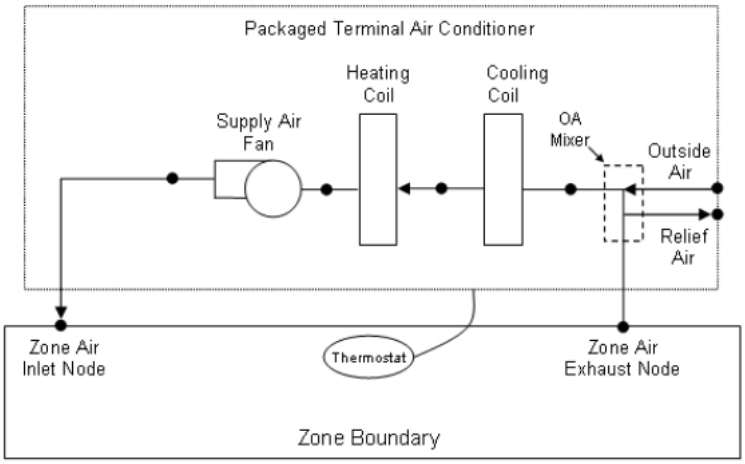
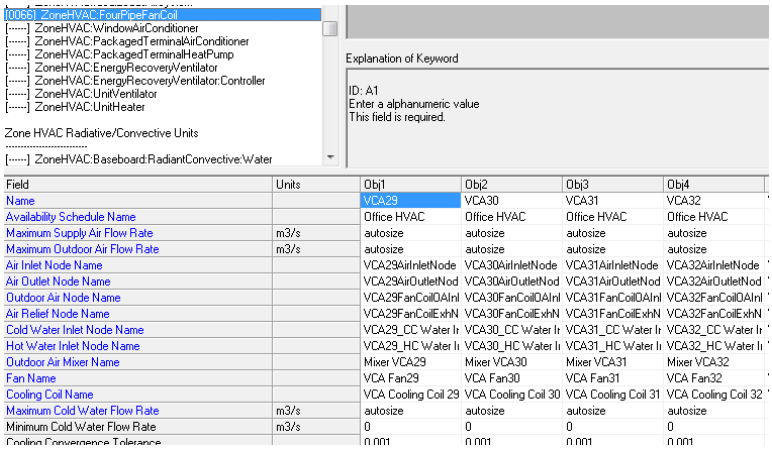


Figura 3.25 - Estrutura e equipamentos do ventilo-convector em EnergyPlus [14].

No modelo do ventilo-convetor, não existe qualquer tratamento a nível da Qualidade do Ar Interior, sendo que parte do ar de exaustão que circula nos espaços e retorna é misturado com ar exterior e insuflado novamente nas zonas, sendo necessários equipamentos auxiliares para garantirem a QAI. Os campos relativos ao fluxo máximo de ar, caudal nominal de água quente/fria e potência nominal foram calculados pelo *software* durante a simulação.



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		VCA29	VCA30	VCA31	VCA32
Availability Schedule Name		Office HVAC	Office HVAC	Office HVAC	Office HVAC
Maximum Supply Air Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Maximum Outdoor Air Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Air Inlet Node Name		VCA29AirInletNode	VCA30AirInletNode	VCA31AirInletNode	VCA32AirInletNode
Air Outlet Node Name		VCA29AirOutletNod	VCA30AirOutletNod	VCA31AirOutletNod	VCA32AirOutletNod
Outdoor Air Node Name		VCA29FanCoilOAInl	VCA30FanCoilOAInl	VCA31FanCoilOAInl	VCA32FanCoilOAInl
Air Relief Node Name		VCA29FanCoilExhN	VCA30FanCoilExhN	VCA31FanCoilExhN	VCA32FanCoilExhN
Cold Water Inlet Node Name		VCA29_CC Water Ir	VCA30_CC Water Ir	VCA31_CC Water Ir	VCA32_CC Water Ir
Hot Water Inlet Node Name		VCA29_HC Water Ir	VCA30_HC Water Ir	VCA31_HC Water Ir	VCA32_HC Water Ir
Outdoor Air Mixer Name		Mixer VCA29	Mixer VCA30	Mixer VCA31	Mixer VCA32
Fan Name		VCA Fan29	VCA Fan30	VCA Fan31	VCA Fan32
Cooling Coil Name		VCA Cooling Coil 29	VCA Cooling Coil 30	VCA Cooling Coil 31	VCA Cooling Coil 32
Maximum Cold Water Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Minimum Cold Water Flow Rate	m3/s	0	0	0	0
Cooling Convergence Tolerance		0.001	0.001	0.001	0.001

Figura 3.26 - Parâmetros de configuração das unidades ventilo-convetoras no *EnergyPlus.*

O ventilo-convetor está ligado à rede de distribuição de calor através da sua bateria de água quente e à rede de frio através da bateria de água refrigerada. O equipamento é controlado de forma a responder às necessidades de remoção das cargas internas, por via da ativação ou desativação das baterias de frio/calor. O fluxo de ar novo e ar de retorno são geridos pelo próprio controlo do equipamento, bem como os caudais de água fria/quente a permutar.

De forma centralizada, a soma dos caudais de água quente ou fria requisitados pelas várias zonas definem a carga instantânea dos equipamentos de produção, caldeira ou *chiller*.

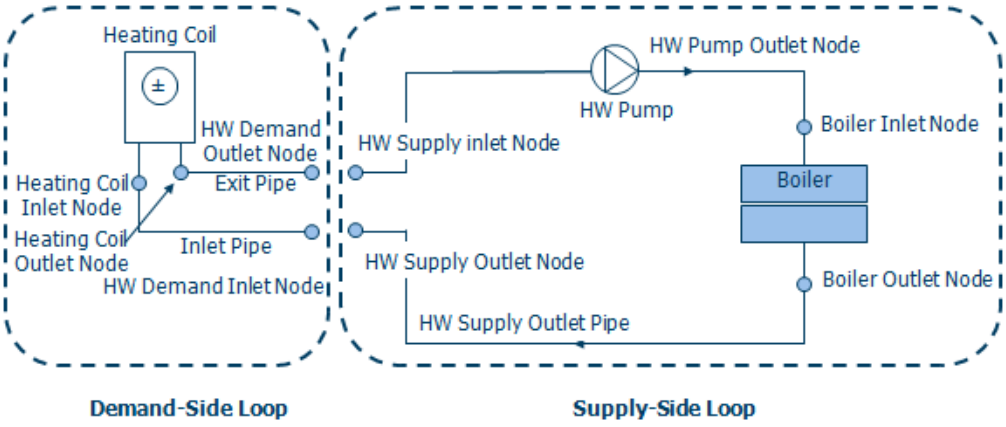


Figura 3.27 - Rede de distribuição da água aquecida aos terminais dos equipamentos ventilo-convetores em *EnergyPlus.*

3.3.8 Sistemas de Ventilação e Tratamento do Ar

A renovação do ar nos espaços climatizados do edifício é feita através de ventilação mecânica por intermédio de duas *Unidades de Tratamento de Ar Novo* que distribuem o ar por condutas que se estendem pelas diversas zonas.

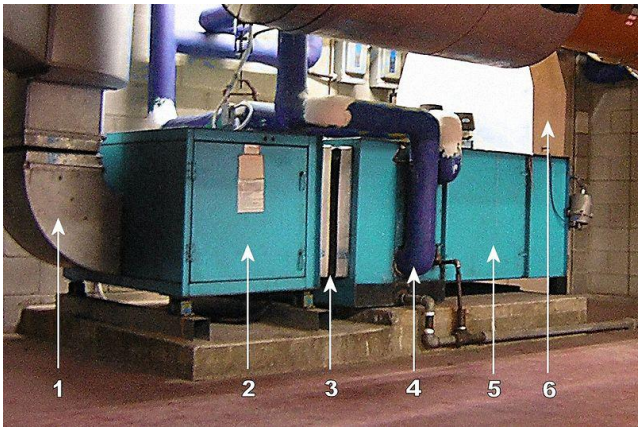
O ar pré tratado, após passar por um filtro e pela bateria de aquecimento ou arrefecimento (consoante a válvula que estiver ativa), é insuflado nas zonas através de um ventilador de insuflação e de grelhas/difusores.

O ar viciado dos espaços é extraído por uma grelha de retorno e "aspirado" por um ventilador de extração conectado à rede de extração de ar, através do qual é efetuada recuperação de energia do ar rejeitado no meio ambiente exterior.

Tabela 3.7 - Características das Unidades de Tratamento do Ar do *Edifício X.*

	UTAN 1	**UTAN 2**
Localização	Cobertura	Cobertura
Tipo	Horizontal - Exterior	Horizontal – Exterior
Caudal insuflado ($\dot{m}_{ins}$)	4,82 m^3/s	4,71 m^3/s
Caudal extraído ($\dot{m}_{ext}$)	2,83 m^3/s	2,83 m^3/s
Permutador	Placas horizontais	Placas horizontais
Nº de Pré-filtros	2	2
Nº de Filtros	1	1
P_{arr} (kW)	84	84
P_{aq} (kW)	84,3	84,3
P_{rec} (kW)	33,6	33,8
Caudal água fria	4 l/s	4 l/s
Caudal água quente	4 l/s	4 l/s

As UTAN integram um permutador de calor de placas horizontais com fluxos cruzados entre ar novo e ar de exaustão, equipado com *bypass,* permitindo no Inverno uma redução das necessidades de aquecimento e no Verão a rejeição do ar de extração, impedindo-o de passar na zona de permuta. Na entrada da UTAN existe um sistema de pré-filtragem de poeiras, bem como na grelha de retorno. As baterias de arrefecimento e aquecimento são constituídas por cobre e alumínio alhetado e são alimentadas por água às temperaturas de 7ºC e 65ºC, respetivamente. O sistema usado para abastecimento da água é um sistema a dois tubos, diretamente do *chiller* e caldeira, respetivamente. A velocidade máxima do ar à entrada das baterias foi definida para não exceder os 2,7 m/s.



1 - Conduta de insuflação
2 - Compartimento do ventilador
3 - Isolador de vibrações (ruído)
4 - Baterias de aquecimento e arrefecimento
5 - Compartimento dos filtros
6 - Conduta de admissão de ar novo/ ar extraído

Figura 3.28 - Estrutura das UTAN existentes no Edifício X

Cada uma das UTAN possui um ventilador de insuflação colocado a jusante das baterias de aquecimento e arrefecimento e um ventilador de extração no final da conduta de retorno.No que respeita à distribuição, cada UTAN é responsável por servir uma zona do edifício (nascente ou poente), através de uma conduta que se estende aos pisos, ramificando-se em seguida pelas respetivas fachadas e alimentando cada zona com o caudal de ar conveniente. Devido à ocupação variável a que estão sujeitas as diversas zonas do edifício e tendo em conta que a QAI é diretamente influenciada pela ocupação dos espaços, foram colocados diversos sensores da QAI que atuam registos motorizados de modo a sincronizar insuflação e extração, permitindo limitar o caudal insuflado em períodos de ocupação baixa e fazendo com que este seja máximo em períodos de elevada ocupação. O retorno da fachada nascente (gabinetes) é feito através de um sistema de condutas paralelo ao de alimentação. Por outro lado, o ar insuflado nas várias zonas localizadas no lado poente é extraído ao nível da galeria da zona central do edifício, através das *courettes* distribuídas ao longo da sua extensão. As temperaturas de insuflação do ar novo variam consoante as condições exteriores.

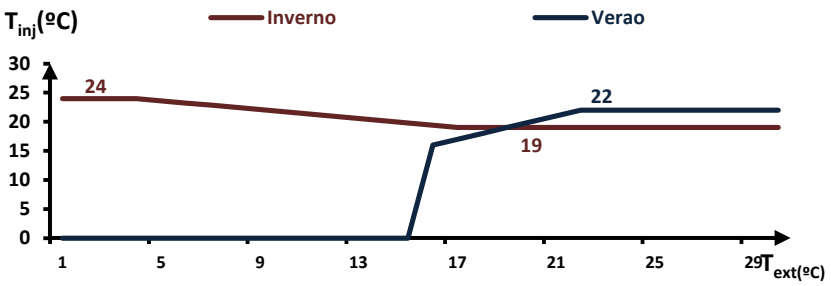


Figura 3.29 - Temperatura do ar insuflado pelas UTAN em função da temperatura exterior para Verão e Inverno.

Durante o Inverno, a temperatura mínima de insuflação do ar corresponde a 19ºC, para temperaturas exteriores $T_{ext} \geq 17ºC$. A temperatura máxima de insuflação é de 24ºC e aplica-se

sempre que as temperaturas exteriores forem iguais ou estejam abaixo dos 4ºC. Para temperaturas exteriores compreendidas no intervalo entre os 4ºC e os 17ºC, a insuflação deverá ser linear entre os 19ºC e os 24ºC.

No Verão, existe uma temperatura de insuflação máxima de 22ºC que deverá ser aplicada sempre que a temperatura exterior seja superior a 22ºC. Caso contrário, sempre que a temperatura do ar exterior seja inferior ou igual a 22ºC, este deverá ser injetado à temperatura a que se encontra (*free-cooling*), permitindo desse modo a redução da carga das baterias de arrefecimento principalmente em períodos noturnos, altura em que essas condições se verificam com mais regularidade.

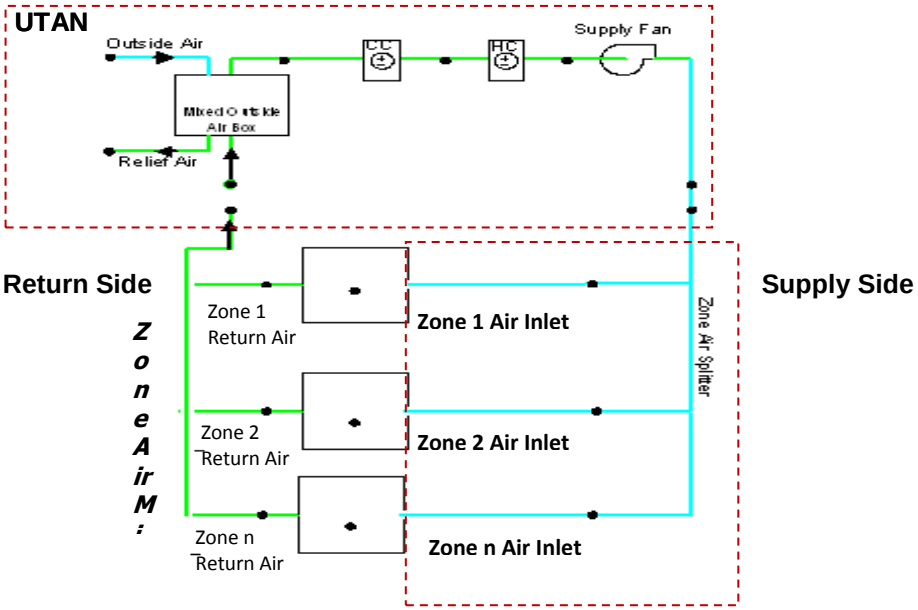
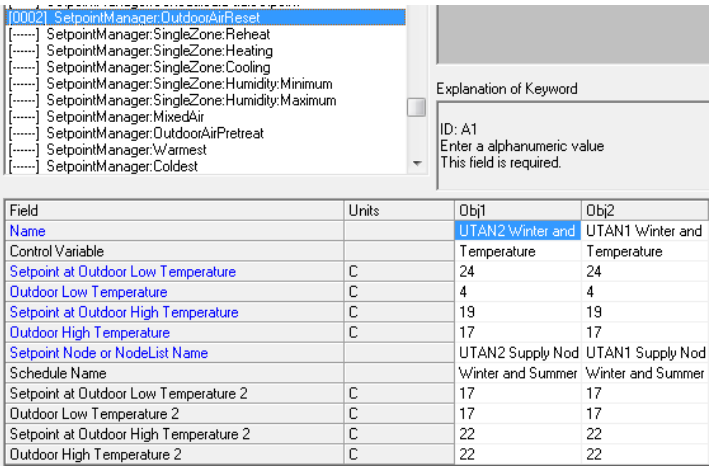


Figura 3.30 - Esquema representativo do funcionamento de uma UTAN modelada em EnergyPlus.

O *EnergyPlus* não possui um objeto absolutamente representativo de uma UTAN (Air Handler Unit). No entanto, permite associar ventiladores de ar exterior a misturadores entre ar novo/ar de retorno e a condutas de distribuição para insuflação multi-zona do ar tratado – Unidades *AirLoopHVAC* associadas a *ZoneSplitter* e *ZoneMixer.* Estas unidades de distribuição do ar tratado culminam nas grelhas de entrada e saída de ar das várias zonas.

Em termos de cumprimento da QAI, não é possível modelar a pré-filtragem e filtragem do ar através do *software*, não sendo possível controlar o nível de impurezas.

Foram modeladas as temperaturas ideais para insuflação do ar em função da temperatura exterior para os dois regimes de funcionamento (horário de Inverno e Verão), conforme as especificações descritas anteriormente.



Field	Units	Obj1	Obj2
Name		UTAN2 Winter and	UTAN1 Winter and
Control Variable		Temperature	Temperature
Setpoint at Outdoor Low Temperature	C	24	24
Outdoor Low Temperature	C	4	4
Setpoint at Outdoor High Temperature	C	19	19
Outdoor High Temperature	C	17	17
Setpoint Node or NodeList Name		UTAN2 Supply Nod	UTAN1 Supply Nod
Schedule Name		Winter and Summer	Winter and Summer
Setpoint at Outdoor Low Temperature 2	C	17	17
Outdoor Low Temperature 2	C	17	17
Setpoint at Outdoor High Temperature 2	C	22	22
Outdoor High Temperature 2	C	22	22

Figura 3.31 - Setpoint das temperaturas de insuflação do ar das UTAN.

Não é possível modelar o caudal máximo de insuflação das UTAN a partir dessas unidades, sendo modelado o caudal máximo de ar novo a ser distribuído à entrada de cada zona.

3.4 Regulamento RSECE aplicado ao Projeto

3.4.1 Enquadramento legislativo

Quando inicialmente foi implementado, através do DL nº1118/98, de 7 de Maio de 1998, o RSECE surgiu com o intuito de introduzir algumas medidas de racionalização, fixando limites à potência máxima dos sistemas a instalar num edifício para, sobretudo, evitar o seu sobredimensionamento, conforme a prática do mercado mostrava ser comum, contribuindo assim para a sua eficiência energética e evitando investimentos desnecessários. O RSECE exigia também a adoção de algumas medidas de racionalização energética, em função da dimensão (potência) dos sistemas, e considerava a necessidade da prática de certos procedimentos de receção após a instalação dos sistemas e de manutenção durante o seu funcionamento normal. Mais recentemente, com o crescimento progressivo da procura em Sistemas de climatização devido ao aumento do consumo energético, surgiu a necessidade de implementar algumas medidas não contempladas anteriormente, visando controlar a QAI, entre outras.

A revisão dos objetivos do RSECE foi motivada pela Diretiva lançada pelo Parlamento Europeu e Conselho em 2003[30] que impunha aos estados-membros a adoção e atualização periódica de medidas que contribuíssem para a redução do consumo energético, tanto em edifícios novos como em edifícios reabilitados, com implementação obrigatória de todas as medidas técnica e economicamente viáveis. De igual modo, a Diretiva aponta para auditorias periódicas ao consumo anual dos Edifícios de maior porte com a disponibilização dessa informação ao público [34].

3.4.2 Aplicação do RSECE ao Projeto de execução do Edifício

O Projeto de Execução do Edifício X foi elaborado ao abrigo do antigo Decreto-Lei, entretanto revogado pelo atual DL nº79/2006, de 4 de Abril 2006. É com base neste DL, atualmente em vigor, que se procederá à validação dos requisitos impostos no Projeto do Edifício, partindo-se do princípio que todas as condições pré-estabelecidas no respetivo Projeto foram efetivamente implementadas na sua execução e se mantêm atualmente. No que respeita ao número mínimo de escalões de aquecimento para valores de potência instalada no qual se insere a caldeira proposta para instalação, o Projeto cumpre com os requisitos. De igual forma, os padrões de QAI no que respeita a caudais mínimos impostos no Projeto estão de acordo com os valores estipulados no regulamento.

Tabela 3.8 - Número mínimo de escalões de aquecimento imposto pelo RSECE e assumido no Projeto.

Potência instalada (kW)	RSECE	Projeto
< 100	1	-
100 - 500	**2**	**2**
500 - 1000	4	-
> 1000	Modulante	-

Tabela 3.9 - Requisitos mínimos de Ar novo pelo RSECE e Projeto.

Caudais mínimo Ar novo (m^3/ocupante . h)	RSECE	Projeto
Laboratórios	35	35
Salas de Aula	30	30
Gabinetes[31]	30	30
Bar	35	35
Biblioteca	30	30

[30] Directiva nº 2002/91CE
[31] No RSECE não é feita a referência para valores mínimos de caudal de ar novo para Gabinetes em Edifícios de ensino. No entanto, assume-se um valor igual ao das Salas de Aula.

No que diz respeito ao cálculo do Índice de Eficiência Energética, que representa o consumo anual de um Edifício em termos de unidade de energia primária normalizada para a área do mesmo, o RSECE define para estabelecimentos de ensino, valores máximos que deverão ser respeitados, diferenciando entre edifícios novos e edifícios existentes.

Tabela 3.10 - Valores limite dos consumos globais específicos em edifícios de ensino existentes

IEE (kgep/m2.ano)	RSECE	Projeto
Existente	15	A calcular
Novo	15	Não aplicável

4. Simulação do Modelo do Edifício

4.1 Considerações e limitações

O *EnergyPlus* é essencialmente uma ferramenta concebida para o dimensionamento de projetos AVAC, nomeadamente potências de equipamentos necessárias para compensar cargas internas e estabelecer as condições de temperatura e conforto estabelecidas nas diversas zonas. Apesar de no presente edifício os equipamentos estarem já projetados e em funcionamento, a simulação não considera a potência instalada desses equipamentos, sendo esta calculada automaticamente (*autosize*) durante a simulação, em função das cargas máximas instantâneas.

Não foi possível obter acesso aos valores históricos correspondentes às cargas médias de ocupação, iluminação e utilização de equipamentos elétricos no edifício, tendo-se considerado numa primeira fase os valores *standard* estipulados pelo RSECE para este tipo de edifício (ensino), exceto para o caso dos Equipamentos elétricos cuja carga horária considerada nesse regulamento aparenta ser excessiva, como de resto se vem a confirmar comparando com o consumo real de 2008 [35].

No que respeita à simulação do Sistema Solar Térmico alimentando um *chiller* de absorção, o *EnergyPlus* apresenta algumas limitações, na medida em que se constatou a impossibilidade de auto dimensionamento da Potência necessária ao sistema Solar térmico, nomeadamente a potência total dos coletores solares em função das cargas do gerador do *chiller*. Apesar de ser possível fazer uma integração entre os dois sistemas, a carga de funcionamento do *Chiller* não afeta o regime de funcionamento do Sistema solar, concretamente a variação do seu caudal circulante e a ativação/ desativação dos equipamentos de aquecimento auxiliares (*Water Heaters).* Esta conclusão tirou-se após visualizar os resultados da integração dos dois sistemas e consultar as equipas técnicas de suporte ao *software*, a quem o processo de implementação deste tipo de integração é desconhecido.

Este tipo de dimensionamento de Sistemas Solares ativos é efetuado por outros softwares tais como o TRNSYS, onde o cálculo é adequado às cargas instantâneas e regime de funcionamento dos *chillers* de absorção. No entanto, tendo em conta que a modelação energética do edifício foi executada no *EnergyPlus*, não foi possível transpor o modelo para o TRNSYS visto não existir integração direta entre os dois programas. De forma a compensar esta limitação, realizou-se a simulação tendo em conta apenas o consumo do *chiller* isoladamente e, a partir da sua potência nominal, regime de cargas e consumo energético do gerador de calor, estimou-se a produção de energia térmica proveniente dos Coletores Solares que seria necessária para abastecer o Gerador, em função das suas características.

4.2 Modelo original – Resultados

De acordo com a definição de temperatura interna de conforto para cada zona anteriormente definida, existem três perfis diferentes a ser considerados – Gabinetes, Laboratórios e Salas de Estudo.

Nesse pressuposto, o *EnergyPlus* permite a configuração desses mesmos perfis de forma a que cada zona específica referencie um deles.

O controlo termostático é realizado tendo como base um horário pré-definido, onde é ajustado o *setpoint* da temperatura pretendida para um determinado período temporal (diário), ao longo de uma determinada época do ano.

No *EnergyPlus* é usado um parâmetro que estabelece e sincroniza o tipo de climatização a ser realizada nas várias épocas do ano (*Control Type Schedule Name*). Esse parâmetro pode assumir os seguintes valores, cada um associado a uma função específica.

Os vários tipos de controlo têm por sua vez vários horários de funcionamento associado a cada um deles, que estabelecem as temperaturas de referência para cada período do dia para cada perfil de zona a considerar.

Concretamente, a definição dos *setpoints* de aquecimento (*single heating setpoint*) e arrefecimento (*single cooling setpoint*) foi feita para três horários distintos, com valores de temperatura de referência para cada perfil a definir (Gabinetes, Laboratórios e Salas de estudo).

Deste modo, para definir o controlo da temperatura ambiente de uma determinada zona, parametrizam-se as épocas do ano em que a zona necessita de aquecimento (tipo 1), arrefecimento (tipo 2), ou simplesmente não carece de qualquer tipo climatização (tipo 0 – períodos noturnos).

Por outro lado, existem alturas do ano em que pode coexistir a necessidade de frio e calor, nomeadamente nos períodos de mudança de estação ou estações intermédias como o Outono e a Primavera, no caso concreto de Portugal. Nesse caso, é referenciado um duplo *setpoint* que permite a comutação entre aquecimento e arrefecimento, sendo necessário definir uma zona morta correspondente à transição (*deadband*).

Normalmente, o período de Inverno, entre Dezembro e Março, está associado à necessidade de aquecimento. Como tal, são associadas as temperaturas internas de conforto térmico para esse período no horário relativo ao *setpoint* de aquecimento.

Por outro lado, entre Junho e Setembro as temperaturas de referência são as de Verão sendo referenciado o horário relativo ao *setpoint* de arrefecimento.

Existem na realidade situações em que as temperaturas exteriores registadas não correspondem ao normal para a época do ano e consequentemente as necessidades de aquecimento podem transformar-se em necessidades de arrefecimento e vice-versa.

O *EnergyPlus* não possui essa flexibilidade de se adaptar às circunstâncias do ano real, sendo que as simulações realizadas referenciam sempre *anos-tipo* e as temperaturas exteriores de referência correspondem ao histórico real de vários anos (base de dados do INEGI para cada zona geográfica).

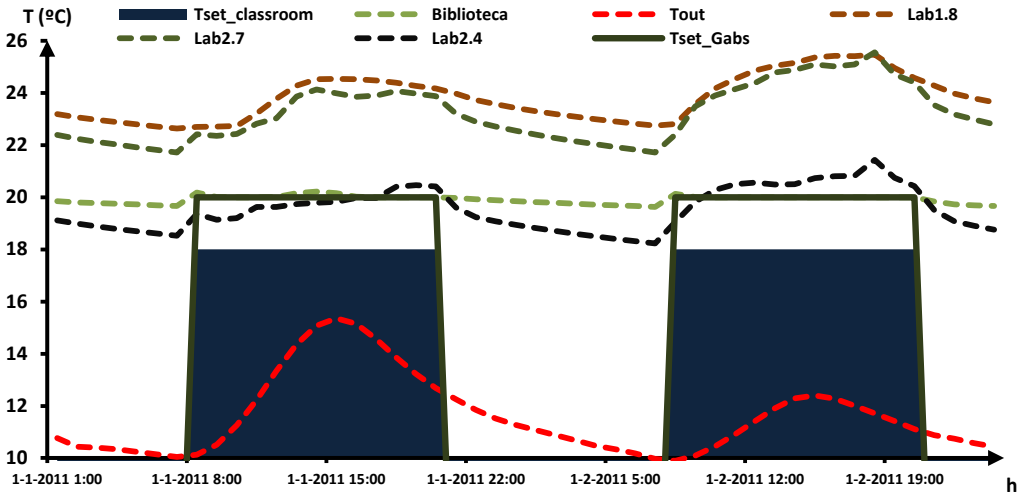


Figura 4.1 - Evolução da temperatura interna nas diversas zonas em função dos *setpoints.*

O *setpoint* para os meses de Inverno corresponde a 20ºC para as zonas de gabinetes e 18ºC para as salas de estudo/aula. O gráfico da **Figura 4.1** traduz uma amostra da simulação anual que abrange dois dias típicos de Inverno, com o valor real das temperaturas por zona ao longo dos dias, bem como a evolução da temperatura ambiente exterior registada na localização do *Edifício X*. Conforme se vê, existe um ligeiro decréscimo da temperatura interna no período noturno, uma vez que não existem cargas internas induzidas por climatização, ocupação, equipamentos ou luminosidade. Este decréscimo não é muito acentuado e corresponde, em média, a cerca de 1ºC de diferença em relação à temperatura interna de regulação. Esta pequena redução pode ser explicada fundamentalmente por dois fatores: bom isolamento das envolventes do edifício (em todas as suas fachadas) e Inverno pouco rigoroso, com temperaturas noturnas raramente abaixo dos 10ºC, ao contrário do que acontece noutros países ou zonas do país.

Por outro lado, verifica-se que a não regulação termostática das zonas relativas à fachada poente (laboratórios) durante o Inverno não compromete o conforto térmico dos seus ocupantes no que diz respeito a necessidades de aquecimento, uma vez que as temperaturas internas durante o dia atingem valores bastante acima dos 20ºC, não sendo necessário

recorrer a aquecimento centralizado. Isto acontece devido à intensa carga sensível a que estão sujeitas estas zonas, uma vez que são zonas de elevada ocupação e número de equipamentos elétricos a funcionar ao longo do dia .

Deste modo, o fluxo instantâneo de calor que se dissipa pelas envolventes das várias zonas de laboratórios (parede e janelas em contacto com o exterior) durante os períodos ativos é bastante inferior ao fluxo de calor induzido pelas cargas sensíveis[32]. Isto resulta num balanço positivo para a zona em questão e consequentemente, num aumento da temperatura interna.

Durante o período noturno, onde as cargas internas são nulas, regista-se um decréscimo da temperatura interna nas zonas de laboratórios superior ao das zonas dos gabinetes, tendo em conta que o diferencial de temperatura com o exterior é superior. Com o intuito de se confirmar a importância da zona geográfica no que respeita às necessidades de climatização (neste caso aquecimento), o gráfico seguinte representa a mesma evolução, numa localização diferente. Neste caso, simulou-se o comportamento do mesmo edifício para a cidade de Chicago, onde as temperaturas exteriores são bastante mais baixas durante o Inverno.

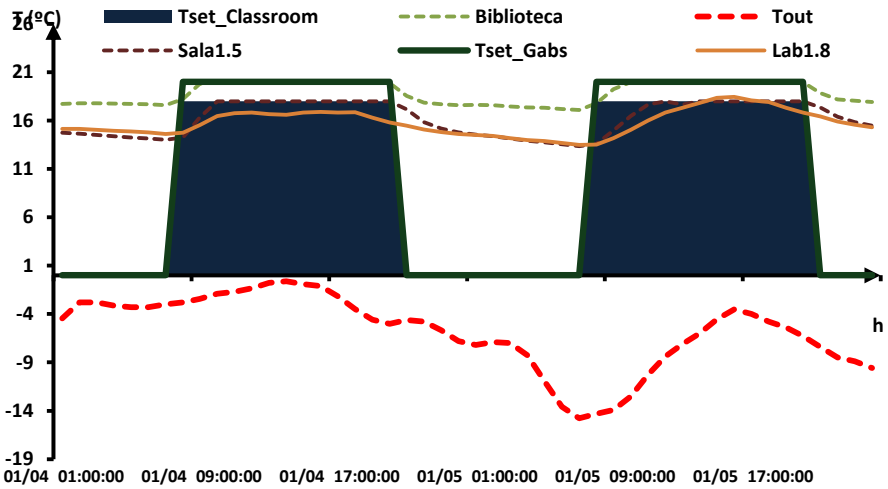


Figura 4.2 - Temperatura interna das zonas para um clima frio de Inverno.

Observa-se no gráfico da **Figura 4.2,** que a temperatura exterior máxima ronda os 0ºC durante o dia e atinge valores mínimos da ordem dos -15ºC durante a noite, condicionando as temperaturas internas das zonas. No período noturno, onde as cargas internas são nulas, as temperaturas internas descem para valores tais que a potência exigida aos equipamentos de climatização quando estes entram em funcionamento é consideravelmente superior.

[32] Ocupação, Iluminação e Equipamentos Elétricos

As zonas não climatizadas e sem ocupação permanente, como é o caso das instalações sanitárias, atingem valores bastante baixos durante o dia. Por outro lado, zonas não climatizadas mas com intensa atividade em termos de ocupação atingem temperaturas próximas das temperaturas de conforto durante o dia, apesar de arrefecerem bastante durante os períodos de vazio. O gráfico mostra que a temperatura interna do Laboratório 1.8 desce para 12ºC durante a noite, voltando a subir a partir das 8h e atingindo os 18ºC perto das 16h, impulsionado pelas cargas internas.

A simulação do comportamento térmico do edifício numa zona de clima frio permite concluir que seria necessário recorrer à climatização da fachada poente (zona dos laboratórios) durante o período de Inverno, contrariamente ao que acontece na localização original. Essa constatação implicaria custos energéticos bastante mais acentuados, de modo a que se pudessem manter os níveis de conforto térmico para os ocupantes durante as horas úteis de funcionamento.

Consumo do Edifício

Tendo em conta as diferentes fontes de energia primária utilizadas no consumo energético, existe uma normalização para o sistema de unidades de referência *tep* ou *kgep* (toneladas equivalentes de petróleo) da energia final de forma a existir uma uniformização e possível comparação dos consumos de energia que utilizam diferentes fontes primárias. No caso concreto, o consumo utilizado no processo de produção de água quente tem por base a queima de gás propano como fonte de consumo.

Os restantes equipamentos utilizados no processo de climatização (*chiller*, bombas centrífugas, ventilo-convetores, ventiladores de extração ou UTAN), bem como os equipamentos de iluminação e equipamentos elétricos utilizam a eletricidade como fonte primária.

Tabela 4.1 – Resultados da simulação em *EnergyPlus* do consumo anual do Edifício X por equipamento.

Tipo	Equipamento	Potência (kW)	Consumo (kWh)	Consumo (%)
Arrefecimento	Chiller Eléctrico Ar/Água	416	44508	**14%**
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	363	2497	**1%**
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		5342	**2%**
	Ventiladores		2925	**1%**
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	53[33]	11169	**4%**
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	91336	**29%**
Equipamentos Eléctricos	Equipamento informático	-	155239	**50%**
Total	-		**313 019**	100%

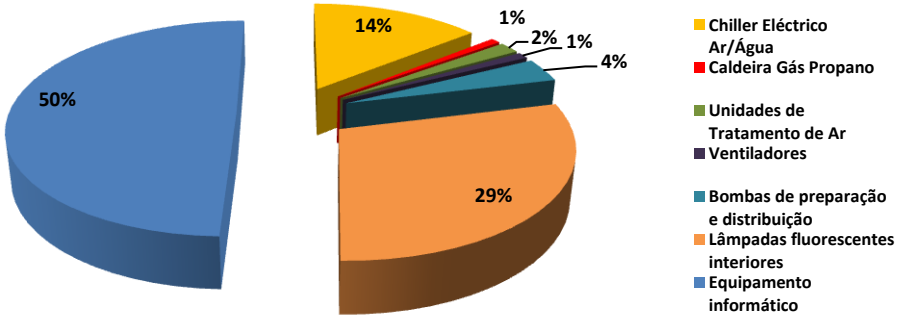


Figura 4.3 - *Mix* do consumo energético do *Edifício X* por tipo de equipamento.

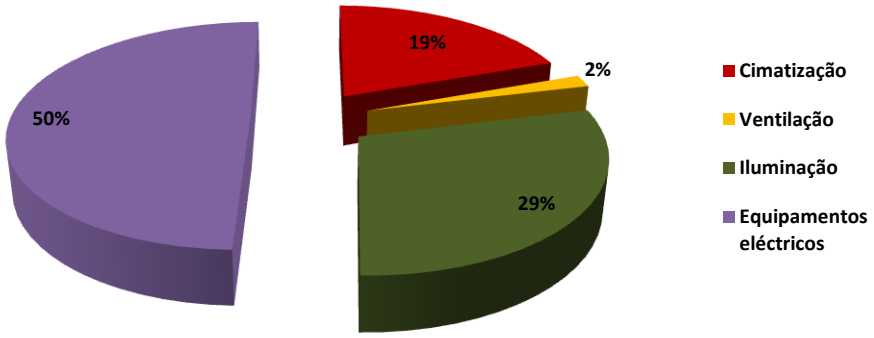


Figura 4.4 - *Mix* do consumo energético do Edifício X por tipo de uso.

[33] Potência da bomba de distribuição de água arrefecida ($P_{elect.arref} = 28{,}3\ kW$) e Potência da bomba de distribuição de água quente ($P_{elect.aq} = 24{,}8\ kW$)

Cálculo do Indicador de Eficiência Energética

Os fatores de conversão de energia útil em energia primária F_{UP} sao os seguintes:

Eletricidade: 0,290 kgep/kWh

Gás Propano: = 0,086 kgep/kWh

Para a zona geográfica do edifício, são indicados

$$IEE = IEE_I + IEE_V + \frac{Q_{out}}{A_p} \tag{4.1}$$

$$IEE_I = \frac{Q_{aq}}{A_p} * F_{CI} \tag{4.2}$$

$$IEE_V = \frac{Q_{arr}}{A_p} * F_{CV} \tag{4.3}$$

IEE_I - Indicador de eficiência energética de aquecimento (*kgep* /m2.ano)

IEE_V - Indicador de eficiência energética de arrefecimento (*kgep*/ m2.ano)

A_p - Área útil do edifício (m2)

F_{CI-} Fator de correção do consumo de energia para aquecimento

F_{CV-} Fator de correção do consumo de energia para refrigeração

Q_{out} - Consumo de energia não relacionado com processos de aquecimento e arrefecimento, ou seja, todo o *input* necessário para a atividade energética do edifício excluindo o processo de climatização;

Q_{aq} - Consumo de energia de aquecimento (kgep/ano)

Q_{arr} - Consumo de energia de arrefecimento (kgep/ano)

$Q_{aq} = Q_{caldeira} \approx 2\,497\ kWh$

$Q_{arr} = Q_{chiller} \approx 44\,508\ kWh$

$$Q_{out} = Q_{bombas} + Q_{ventiloconvectores} + Q_{UTAN} + Q_{Ilum} + Q_{Equip}$$
$$\approx 11\,169 + 2\,925 + 5\,342 + 91\,336 + 155\,239 = 266\,011\ kWh$$

$A_p = 3329\ m^2$

Tendo em conta que o Edifício de localiza na zona climatérica I_1V_1, que corresponde à zona para a qual é feita a normalização, os fatores de correção do consumo de Energia F_{CI} e F_{CV} assumem valor unitário.Aplicando o respetivo fator de conversão kWh/*kgep*, obtém-se um total de 114 352 kgep/ano, sendo este o valor utilizado no cálculo do IEE do edifício.

Tabela 4.2 - Consumo de Energia primária por tipo de fonte.

Tipo	Fonte Primária	Energia Útil (kWh)	Energia Primária (kgep)
Aquecimento	Propano	2 497	215
Arrefecimento	Eletricidade	44 508	12 907
Bombas	Eletricidade	11 169	3 239
Ventiladores/UTAN	Eletricidade	8 267	2 397
Iluminação	Eletricidade	91 336	26 487
Equipamentos	Eletricidade	155 239	45 019
Total		**313 019**	**91 264**

O regulamento que estabelece os limites dos consumos nominais específicos dos edifícios estipula um IEE máximo de 15 *kgep* /(m^2/.ano) para as instituições de ensino.

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{215}{3329} \times 1 + \frac{12\,907}{3329} \times 1 + \frac{78\,142}{3329} = 27{,}4 \ \textbf{kgep}/\boldsymbol{m^2.ano}$$

Este valor supera o valor máximo estipulado no RSECE para um edifício deste tipo. Deste modo, pode-se afirmar que o edifício apresenta um consumo excessivo e possui um baixo desempenho energético nas condições atuais de projeto.

Decidiu comparar-se o consumo anual dos equipamentos elétricos resultante da simulação com o consumo real no ano de 2008, dados disponíveis e obtidos a partir da dissertação de *Santos* [35].

Tabela 4.3 - Comparação entre os consumos simulados e o consumo real em 2008.

	Iluminação	Equipamentos elétricos	Climatização[34]	Total
Consumo (MWh)	**64**	**98**	**165**	**327**
Mix Consumo (%)	20%	30%	50%	
Consumo simulação/Consumo 2008 (%)	143%	158%	40%	96%

Analisando os consumos verifica-se que os equipamentos elétricos das várias zonas do edifício consumiram em 2008 cerca de 98 MWh, tendo sido o valor obtido na simulação bastante mais

[34]Os dados reais de 2008 incluem o consumo relativo a ventilação como parte da climatização

elevado (+58%) A mesma tendência é verificada para o consumo relativo aos sistemas de iluminação, superior na simulação em cerca de 43%. No que respeita ao consumo em climatização, os valores obtidos na simulação representam apenas 40% do valor registado em 2008.

Devido à falta de sensibilidade que se tem na avaliação das cargas horárias dos equipamentos elétricos, uma opção passa por usar como referência o valor registado em 2008, que teoricamente estará mais próximo do padrão normal de consumo mas que, ainda assim, carece de representatividade.

Tabela 4.4 - Resultados da simulação em *EnergyPlus* do consumo anual do Edifício X por equipamento.

Tipo	Equipamento	Potência (kW)	Consumo (kWh)	Consumo (%)
Arrefecimento	Chiller Elétrico Ar/Água	416	44 508	**17%**
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	363	2 497	**1%**
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		5 342	**2%**
	Ventiladores		2 925	**1%**
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	53	11 169	**4%**
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	91 336	**36%**
Equipamentos Eléctricos	Equipamento informático	-	98 000	**38%**
Total	-		**255 780**	100%

Corrigindo o valor de consumo para os equipamentos elétricos para um valor que se prevê ser mais próximo do real, obtém-se ainda assim um IEE superior ao indicado no regulamento.

$$\boldsymbol{IEE_{corrigido}} = \frac{215}{3329} \times 1 + \frac{12\,907}{3329} \times 1 + \frac{60\,544}{3329} = 22{,}1$$

Nesse sentido, torna-se fundamental apresentar medidas que potenciem o aumento da eficiência energética e que conduzam a uma redução substancial do consumo sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes.

Os fatores de conversão entre energia útil e energia primária indicam que as maiores reduções do IEE são obtidas através de poupanças nos equipamentos que utilizam eletricidade como fonte primária, tendo em conta que o baixo fator de conversão, F_{UP} , associado aos combustíveis sólidos e gasosos (entre os quais o propano) provoca uma redução pouco acentuada no IEE.

4.3 Soluções Alternativas

Com o intuito de melhorar o desempenho energético do Edifício X, diversas soluções foram consideradas.

Em primeiro lugar, importa decidir em que equipamentos atuar tendo em conta o seu impacto no consumo total do edifício.

De igual forma, devem ser diferenciadas soluções onde existe substituição direta do equipamento ou apenas ajustes que melhorem a eficiência dos existentes. Esta última solução deverá ser preferencial, uma vez que substituição de equipamentos pode alterar a estrutura de funcionamento do sistema de climatização como um todo e redundar em custos mais elevados.

Além disso, atuar nos equipamentos já existentes permite usufruir do seu serviço durante mais tempo, permitindo uma maior rentabilidade do investimento realizado no passado com a sua instalação.

Foram identificadas possíveis soluções para melhorar a eficiência do edifício:

(i) Instalação de um sistema solar fotovoltaico capaz de fornecer energia elétrica a equipamentos consumidores no edifício durante os períodos de Verão e parte dos períodos de Inverno

(ii) Aumento do rendimento da caldeira a gás propano através da instalação de economizadores (recuperação de calor)

(iii) Instalação de um sistema solar de ar condicionado (SSAC) constituído por um sistema solar térmico e por um *chiller* de absorção

(iv) Sistema de iluminação baseado em sensores com ajuste de iluminação artificial em função do nível de iluminação natural (*dimming*)

(v) Sistemas de protecção solar automáticos para as Fachadas Nascente e Poente

4.3.1 Viabilidade das soluções

(i) Apesar de suportar a modelação através de sistemas fotovoltaicos, o âmbito da solução alternativa passa por reduzir o consumo dos vários equipamentos aumentando a sua eficiência e não por reduzir a fatura elétrica do edifício. Esta última abordagem poderia de facto ser conseguida através da instalação de um sistema fotovoltaico capaz de alimentar parcial ou totalmente as cargas instantâneas do edifício (associado

a um sistema de *backup* para os períodos onde a produção fosse insuficiente para abastecer o consumo).

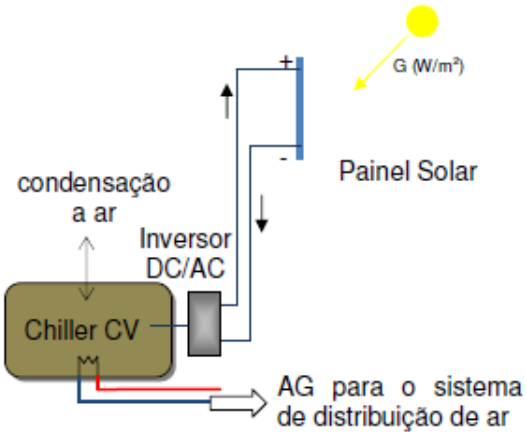


Figura 4.5 - Sistema solar fotovoltaico alimentando o *chiller* elétrico.

Nesse caso, o consumo energético do edifício não sofreria alterações, no entanto, ter-se-ia como mais valias o facto de se reduzir substancialmente a energia elétrica importada da rede. Não obstante, poder-se-iam anular as emissões de CO_2 que porventura poderiam ser originadas na fonte de produção elétrica utilizada para abastecer o consumo do edifício.

Saliente-se, no entanto, o facto de esta ser uma solução bastante interessante quer do ponto de vista da redução da fatura elétrica, quer da flexibilidade em termos de equipamentos instalados, uma vez que envolve apenas a instalação de um sistema solar fotovoltaico sem ser necessário substituir qualquer um dos grandes equipamentos de climatização originais. Esta solução <u>não foi estudada</u> uma vez que não alteraria os fluxos de energia do Edifício nem as cargas pedidas aos equipamentos de produção e distribuição. Esta é uma medida que, não implicando uma redução no consumo energético e do IEE, não satisfaz os critérios impostos no RSECE.

(ii) Relativamente à instalação de economizadores associados ao queimador da caldeira, o *EnergyPlus* não possui essa funcionalidade. No entanto, o seu impacto no consumo final do edifício seria baixo uma vez que o objectivo seria reduzir o consumo de propano numa percentagem pouco significativa (normalmente os economizadores permitem reduções até 10%). Tendo em conta que o consumo equivalente de gás propano como energia primária tem um peso bastante menor ao da electricidade, uma variação dessa ordem de grandeza contribuiria pouco para melhorar o IEE do edifício. Deste modo, esta solução <u>não foi estudada.</u>

(iii) A substituição do *chiller* eléctrico por um equipamento mais eficiente é uma solução interessante, considerando o seu impacto no consumo total do edifício. Um dos processos suportados pelo *EnergyPlus* passa por produzir água refrigerada a partir de um *chiller* de absorção, alimentado por um Sistema solar térmico que funciona como gerador de calor.

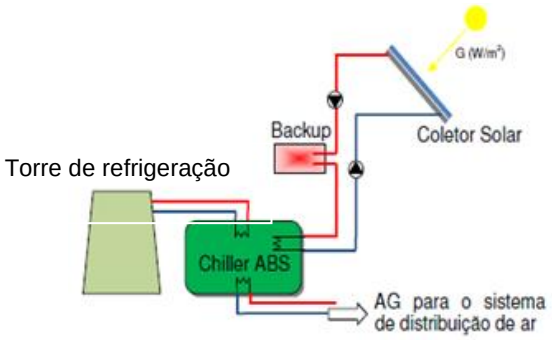


Figura 4.6 - *Chiller* de absorção alimentado por um Sistema solar térmico.

No que respeita à fonte de calor necessária para o processo de refrigeração, o *EnergyPlus* suporta a ligação do equipamento de arrefecimento a uma fonte de produção tanto de vapor como de água aquecida. Esta solução foi estudada.

(iv) Um sistema de ajuste de iluminação permite um aproveitamento mais eficaz da luminosidade natural. Este sistema permite utilizar sensores de luz que medem a intensidade luminosa em determinados pontos de uma zona e regulam as necessidades de iluminação artificial em função dos níveis de conforto instantâneo da iluminação para essa zona. Esta solução foi estudada.

(v) A utilização de sistemas de sombreamento é um método recorrente que visa sobretudo a redução de ganhos térmicos por via da radiação solar nos períodos de Verão mas que pode servir também para restringir as perdas térmicas pela envolvente e aumentar os ganhos solares por radiação durante o Inverno. A aplicação das tecnologias de sombreamento e controlo solar mais recentes permitem uma redução substancial no consumo de arrefecimento dos Edifícios, bem como outras mais-valias, tais como o conforto visual dos ocupantes ou, em certos casos, a redução do consumo em aquecimento. Esta solução foi estudada.

4.3.2 Implementação das soluções

4.3.2.1 Integração do Sistema Solar Térmico com *Chiller* de Absorção

No caso concreto, a solução proposta passa pela instalação de um conjunto de coletores solares térmicos do tipo *Flat-Plate*[35] na cobertura do edifício, capaz de funcionar durante grande parte do período de Verão alimentando um *chiller* de Absorção com água aquecida às condições normais de funcionamento. O Painel Solar Térmico é tipicamente constituído por um número variável de Coletores Solares cuja função é converter a Energia Solar incidente em Energia Térmica através do aquecimento do fluido circulante. Dependendo da funcionalidade do sistema, o fluido circulante pode ter propriedades distintas, nomeadamente maior ou menor condutividade térmica e temperaturas de evaporação.

No caso concreto, tendo em conta as características de alimentação dos modelos de *chiller*[36] disponíveis no *EnergyPlus*, o fluido utilizado é a água aquecida a temperaturas consideradas baixas para estas aplicações, normalmente abaixo dos 80ºC. O *software* encontra-se limitado a um único tipo de equipamento, concretamente um *chiller* de efeito simples. Este modelo possui vários parâmetros a introduzir como *inputs*, sendo que alguns deles são auto dimensionáveis.

A implementação de um *chiller* de absorção induz uma complexidade no sistema em relação ao *chiller* elétrico, devido à necessidade de integrar uma torre de refrigeração para efetuar o ciclo de condensação.

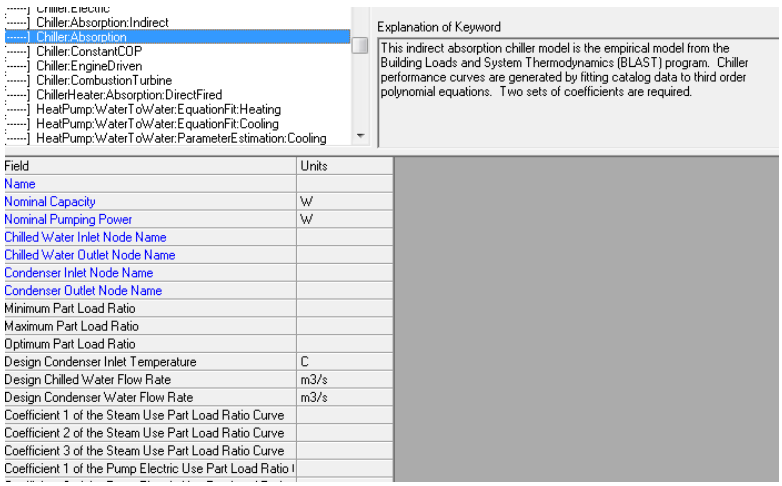


Figura 4.7 - Seleção do tipo de *chiller* de absorção a incluir no modelo do *EnergyPlus.*

---

[35] Sistema de orientação fixa e único tipo de colectores solares disponível no *EnergyPlus*
[36] Funciona com temperaturas de alimentação abaixo dos 100ºC (estado líquido)

Consultando a base de dados disponível no *EnergyPlus*, constatou-se a inexistência de modelos base que integrem Sistemas Solares a alimentar *Chillers* de Absorção, existindo apenas a integração direta de Sistemas Solares para fins de uso doméstico (AQS).[37]
Por defeito, o *EnergyPlus* permite simular um sistema de arrefecimento ambiente através de um *Chiller* de Absorção sem ser necessário definir o tipo ou a potência da fonte produtora de calor/ gerador, definindo-se apenas para o efeito a temperatura de alimentação dessa fonte. Neste sentido, numa primeira fase, foi feita uma simulação sem se considerar a potência disponível pelo Sistema Solar Térmico, calculando-se a capacidade nominal do *chiller* para as condições de projeto pretendidas. A potência nominal do *chiller* e a potência das bombas que permitem a circulação do caudal nos vários ciclos são auto dimensionáveis e dependem da globalidade das cargas sensíveis do edifício.

O caudal circulante nos ciclos de condensação, evaporação ou gerador são auto dimensionáveis pelo *software* e dependem também da carga instantânea do *chiller.*

O modelo necessita conhecer alguns parâmetros, tais como:

1. *Chilled Water Inlet* and *Outlet* - Identificação dos nós de ida e retorno da água arrefecida para a instalação. Corresponde ao evaporador, onde existe a remoção das cargas internas através do fornecimento de água arrefecida às baterias dos *FanCoils* (≈ 7ºC-12ºC)
2. *Condenser Inlet* and *Outlet* – Identificação dos nós de ida e retorno da água resultante do ciclo de condensação. Corresponde ao condensador, onde existe permuta de calor com a água armazenada na Torre de Refrigeração (≈ 30ºC-35ºC)
3. *Generator Heat Input Function Ratio* – Equação que descreve o comportamento do gerador em função do fator de funcionamento do *Chiller (Part-Load Ratio*).

A Potência Nominal do *chiller* é calculada tendo por base a capacidade máxima do seu evaporador, ou seja, a quantidade máxima de calor instantâneo que se pode retirar dos espaços a climatizar.
Esse valor é obtido através de simulações para o dia mais representativo do ano em termos de intensidade das cargas internas e normalmente está associado a temperaturas ambiente extremas, repercutidas nas condições de projeto (dia típico de Verão). No caso concreto, o

[37] De forma a comprovar a viabilidade dessa integração, recorreu-se ao *website de* suporte gerido pelas equipas do *EnergyPlus* (DOE-USA). No entanto, apesar de no manual de utilização do *software* ser apontada essa possibilidade, as equipas de suporte negaram desconhecer o procedimento, alegando falta de experiência neste tipo de integração.

COP do c*hiller* representa o rácio entre a quantidade de energia sob a forma de calor que se tem de fornecer ao gerador ($Q_{gerador}$) para se remover uma determinada quantidade de calor dos espaços a climatizar($Q_{evaporador}$). Este valor é indicado nos catálogos do equipamento como garantia de eficiência para todas as gamas de funcionamento.

$$\boldsymbol{COP} = \frac{\boldsymbol{Q_{evaporador}}}{\boldsymbol{Q_{gerador}}} \tag{4.4}$$

O parâmetro *PLR* representa o Factor de Capacidade do *chiller*, i.e, a sua carga instantânea em função da carga nominal. Este valor está compreendido entre 0 e 1.

$$\boldsymbol{PLR} = \frac{\boldsymbol{Q_{evaporador}}}{\boldsymbol{Q_{evap_{máx}}}} \tag{4.5}$$

De modo a determinar-se o regime de funcionamento do gerador de calor em termos de carga instantânea, tem-se:

$$\boldsymbol{GeneratorHIR} = \frac{\boldsymbol{Q_{gerador}}}{\boldsymbol{Q_{Chiller_{nominal}}}} = \frac{\boldsymbol{Q_{gerador}}}{\boldsymbol{Q_{evap_{max}}}} \tag{4.6}$$

$$\boldsymbol{GeneratorHIR} = \frac{\boldsymbol{Q_{gerador}}}{\boldsymbol{Q_{evaporador}}} * \boldsymbol{PLR} = \frac{\boldsymbol{PLR}}{\boldsymbol{COP}} \tag{4.7}$$

Conclui-se que, quanto maior o rácio de desempenho do *chiller*, menor a quantidade de calor pedida ao gerador. Contrariamente, quanto maior o Fator de Capacidade instantâneo do *chiller,* maior a carga pedida ao gerador.

O Sistema Solar Térmico resulta, na sua globalidade, da associação de vários equipamentos e componentes – coletores, bombas, tanques, entre outros. Tendo em conta que este sistema deverá funcionar como fonte de alimentação do *chiller* durante todo o período em que existam necessidades de arrefecimento, a escassez do recurso solar *per si* poderia condicionar as condições de funcionamento do próprio *chiller*. Deste modo, o software de simulação permite associar aos coletores solares um sistema de *backup* e ajuste cuja função é assegurar as condições ótimas no que respeita à temperatura da água à entrada do *chiller*. Tanto a estrutura como o controlo deste sistema podem ser dimensionados de maneiras distintas, dependendo do nível de rigor e do propósito que se pretende para a instalação.

O Sistema Solar Térmico pode ser estruturado com a existência de um único tanque cuja função de armazenamento se conjuga com a de ajuste de temperatura do fluído. Por outro lado, existe a possibilidade de integrar dois tanques, tendo um a função de armazenamento e o outro a função de ajuste. Neste último caso, existem duas configurações possíveis no que respeita às características de cada tanque.

A integração dos vários equipamentos é nivelada por camadas que traduzem o modo de funcionamento do sistema.

(i) *Source side*[38] constituído pelo conjunto dos vários coletores solares
(ii) *Use side*[39] corresponde à instalação de consumo *(chiller)*
(iii) *Supply side* corresponde ao interface entre a fonte e a instalação

O *interface* entre fonte de produção e consumo é constituído por dois tanques interligados por uma válvula de ajuste de temperatura[40], o tanque de armazenamento e o tanque auxiliar instantâneo, cuja função é encaminhar o caudal de água nas condições ótimas de funcionamento para a instalação.

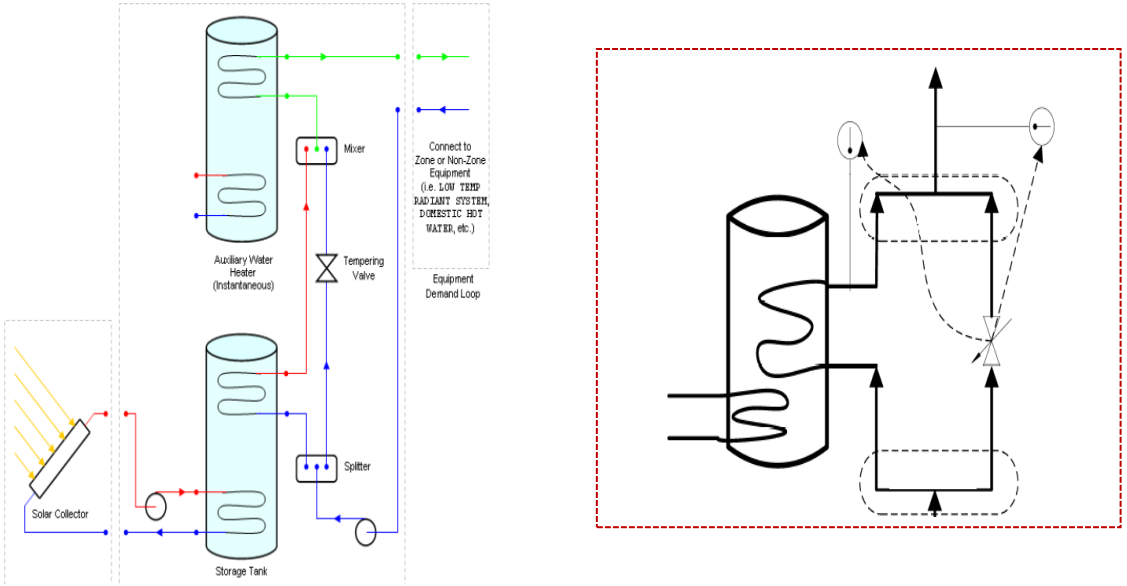


Figura 4.8 - Estrutura adotada em *EnergyPlus* para o Sistema de Produção e distribuição de água quente.

O nível intermédio possui ligações com os dois ramos do sistema. Na interface com a fonte, possui como entrada o fluido aquecido pelos coletores solares e como saída o fluido a uma temperatura mais baixa, que corresponde à mistura entre o fluido acumulado no tanque e o fluido proveniente da instalação. Na entrada do sistema existe uma bomba que faz circular o fluido aquecido proveniente dos coletores. O controlo deste *loop* é feito ativando ou desativando essa bomba, conforme a diferença de temperaturas entre os nós de entrada e saída assim o exija. Sempre que o recurso solar não seja suficientemente intenso para

[38] Fonte - produção
[39] Instalação - consumo
[40] *three-way tempering valve*

provocar uma variação de temperatura considerável[41] entre entrada e saída, a bomba reduz o caudal circulante ou passa ao estado *off*[42]. Neste caso, não existe transferência de calor para o fluido armazenado no tanque. Para que a instalação continue a ser alimentada com as temperaturas ótimas de funcionamento, recorre-se, no caso em que seja necessário, a uma fonte elétrica para fazer o aquecimento[43].

Esta estrutura permite otimizar o aproveitamento do recurso solar através da capacidade de armazenamento de calor em excesso no tanque, sem comprometer as condições ótimas de temperatura na instalação. Assim, sempre que o fluido no tanque de armazenamento atinja temperaturas acima da temperatura de fornecimento, recorre-se a uma válvula misturadora, cuja função é estabelecer uma temperatura de equilíbrio ótima através da regulação do caudal proveniente da instalação que se mistura com o caudal de saída do tanque de armazenamento. O fluido resultante desta mistura de caudais é encaminhado para o tanque auxiliar antes de prosseguir para o equipamento consumidor. Saliente-se que a válvula faz um *bypass* ao tanque de armazenamento misturando-se apenas com o fluido que dele sai. Isto evita que a temperatura do tanque se reduza e como tal atenue a sua capacidade de armazenamento de calor.

Conforme foi indicado anteriormente, a integração entre Sistema Solar Térmico e *Chiller* de Absorção não é dinâmica, tendo em conta que todos os cálculos de consumo do *Chiller* são independentes e autónomos da sua fonte de calor (*demand side).* Deste modo, o dimensionamento da fonte quente tem de ser feito *a posteriori*, após serem calculados os seus parâmetros de carga.

As variáveis relevantes para o dimensionamento do Sistema Solar são:

(i) Potência Nominal do *chiller* de Absorção;
(ii) Regime de Funcionamento (*Part-Load Ratio*) do *chiller*
(iii) Potência do gerador de calor

A partir da Potência nominal do *chiller* é possível fazer o *benchmarking* relativamente ao equipamento a ser instalado. O regime de funcionamento pode ser obtido durante um período representativo onde as cargas internas são relevantes (tipicamente dias mais quentes do Verão) e indica se efetivamente o *chiller* funciona próximo da carga máxima nesses períodos ou se existe sobre dimensionamento da sua capacidade. Após se selecionar o tipo de *chiller* a

[41] Modulada pelo utilizador
[42] Modulante ou cíclica – modulate or cycle
[43] Usualmente uma serpentina de aquecimento (*heating coil)*

instalar, através do seu COP de referência pode-se dimensionar os valor de carga instantânea do gerador de calor, em função do regime de funcionamento *PLR* (variável) e do COP (fixo).

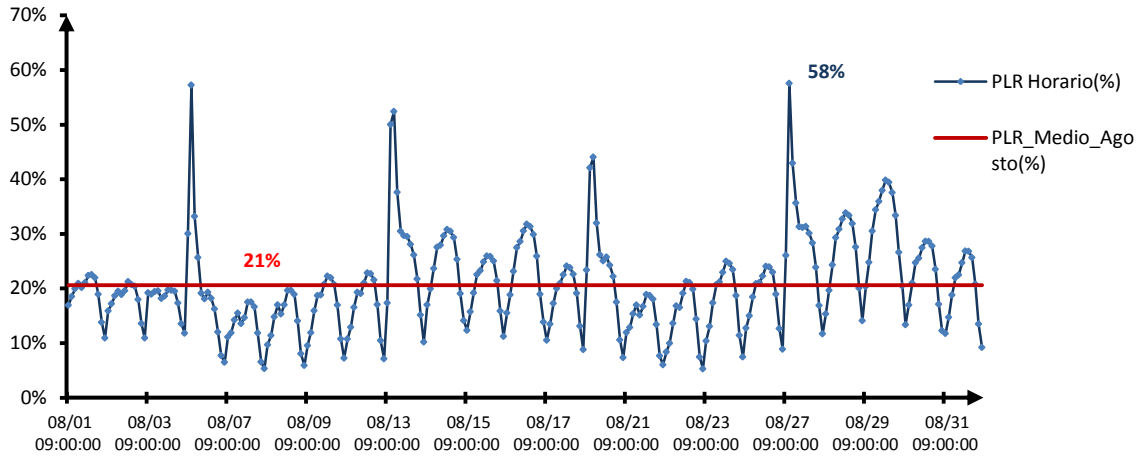


Figura 4.9 - Regime de funcionamento do *chiller* de absorção para um mês de Verão.

Após a simulação, os resultados obtidos foram os seguintes:

$$\begin{cases} P_{nominal_{Chiller}} = 565{,}9\ kW \\ PLR_{Medio\_Agosto} = 21\% \\ PLR_{Max\_Agosto} = 58\% \end{cases}$$

Com o regime de cargas do gerador pré-dimensionado para os períodos mais quentes da simulação, é possível dimensionar de forma aproximada a área coberta e o número necessário de painéis solares a instalar, tendo em linha de conta os vários fornecedores disponíveis no mercado. Na seleção do tipo de *chiller* a instalar, a análise dos resultados da simulação anual é de extrema importância. No entanto, a carga máxima pedida aos equipamentos de produção de calor (caldeira) e frio (*chiller*) pode considerar apenas as condições de projeto, definidas como *DesignDay* no *EnergyPlus*, ou seja, a representação dos casos extremos para o Inverno e Verão.

No caso concreto, optou-se por incluir este cálculo na simulação, significando que a potência nominal dos equipamentos de produção de frio e calor está associada a valores máximos de temperatura ambiente para Inverno e Verão[44] com as cargas sensíveis dimensionadas para o valor máximo. As temperaturas extremas de projeto associadas às cargas internas instantâneas definem a potência nominal do *chiller*.

[44] Retirados da base de dados do LNEG, que contempla informação histórica meteorológica para a localização pretendida, Lisboa

As temperaturas exteriores de projeto consideradas para o cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento foram retiradas do modelo meteorológico para a cidade de Lisboa, elaborado pelo INETI e disponível no site do *EnergyPlus* [15].

Na simulação anual, a potência de evaporação máxima pedida ao *chiller* corresponde a $P_{evap,max} = 62\% * P_n$, e ocorre para um período da manhã do dia 23/07. Este valor corresponde a 62% de P_n =566 kW, ou seja, $P_{evap,max} \approx 351\ kW$

Tendo este valor em consideração, a seleção do *chiller* de absorção foi feita após análise de alguns catálogos, tendo-se selecionado um equipamento com uma Potência nominal suficiente para satisfazer a carga máxima simulada.

O equipamento escolhido é da marca *Shuangliang* e apresenta uma potência nominal de funcionamento $P_n = 580\ kW$.

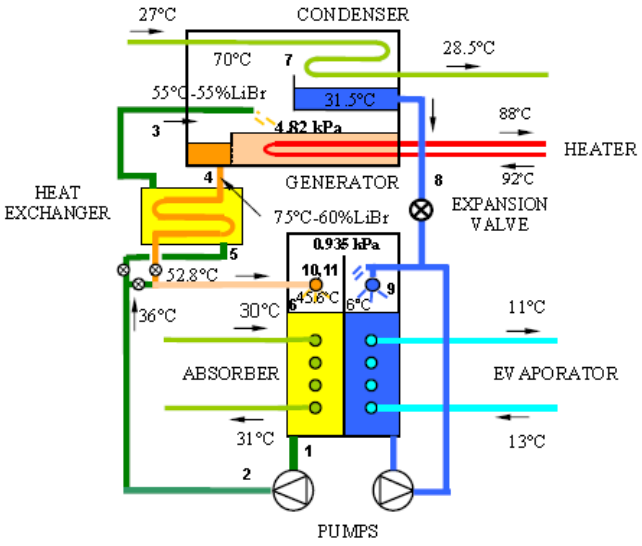


Figura 4.10 - Esquema do *chiller* de absorção obtido a partir do catálogo do fabricante (*Shuangliang*).

A seleção do tipo de painel solar teve em conta os modelos existentes no *EnergyPlus*, que referenciam equipamentos certificados pelo SRCC[45] – entidade responsável pela certificação deste tipo de equipamentos. As características técnicas encontram-se previamente incorporadas no modelo do *software*. Quanto maior a dimensão, menor o número de painéis solares necessários para cobrir a área total, menor o número de interligações em série (tubagens) e menores as perdas térmicas associadas ao fluxo circulante.

[45] Solar Rating and Certification Corporation - USA

A área de coletores instalados depende da capacidade térmica dos mesmos, devendo suprir as necessidades de consumo do *chiller* para períodos de ponta. No entanto, a sua instalação depende da área de cobertura disponível no Edifício e do investimento necessário, podendo existir um sub-dimensionamento caso essa opção seja viável. Nesse caso, as necessidades remanescentes seriam satisfeitas recorrendo a equipamentos auxiliares, cuja potência deve ser dimensionada em função dessas necessidades.

Optou-se por estudar a viabilidade da instalação dos painéis descritos na **Tabela 4.4**, com área unitária de ≈ 3 m^2.

Tabela 4.5 - Características de catálogo do *chiller* e painéis solares usados no SSAC.

Características/ Equipamento	*Chiller*	Painel Solar
Marca	*Shuangliang* - China	*Alternative Energy Technologies* – USA
Tipo	Efeito-simples (*LiBr*)	Painel fixo transparente - *Flat Glazed Plate*
Modelo	165H2	AE-32
Potência Nominal (kW)	580	-
COP catálogo/ Eficiência global	0.7	0.691
Caudal Nominal de Evaporador (m3/h)	100	-
Caudal Nominal Condensador (m3/h)	189	-
Caudal Nominal Gerador de Calor (kg/h)	10200	-
Área Bruta (m2)	-	2,965
Caudal máximo fluido circulante (l/h.m2)	-	72,36
Material Colectores	-	Alumínio anodizado
Cobertura dos colectores	-	Vidro transparente de alta transmissividade
Eficiência de transmissão (efeito do vidro cobertura)		90%
Absortividade do Coletor		0.96

O processo de seleção do número de sistemas coletores solares, bem como a sua inclinação, foram feitos recursivamente, numa tentativa de ajustar da melhor forma possível o consumo à produção. A disposição dos coletores solares térmicos ao longo da cobertura do edifício foi escolhida em função dos ganhos solares, tendo-se projetado alguns coletores em posição horizontal (α = 0ºC) e os restantes com α ≈ 30ºC, uma inclinação aconselhável para a localização do Edifício (inclinação que maximiza os ganhos solares anuais em média).

Numa primeira fase foram projetados 159 unidades deste tipo na cobertura do Edifício, através do modelo gráfico em *Google SketchUp*

Figura 4.11 - Painel solar do tipo orientação fixa [8].

O regime de funcionamento do *chiller* foi simulado para cada instante ao longo de um período representativo nos vários meses em que se pretende arrefecimento ambiente (de Maio a Setembro), tendo em conta as suas características de funcionamento, i.e COP= 0,7. Desse modo, foram determinadas as necessidades térmicas do gerador de calor (em kW) e a capacidade térmica do conjunto de coletores solares instalados, determinando-se dessa forma o rácio entre capacidade de abastecimento e necessidades de consumo.

Durante o período matinal, quando o Sol está mais baixo, é mais proveitosa a existência de coletores com alguma inclinação, tendo-se optado por projetar coletores inclinados ao longo de toda a fachada nascente. Nos períodos da tarde, o Sol está virado a Sul e Poente e tem maior elevação, donde a melhor solução passa por distribuir os painéis no modo *flat*.

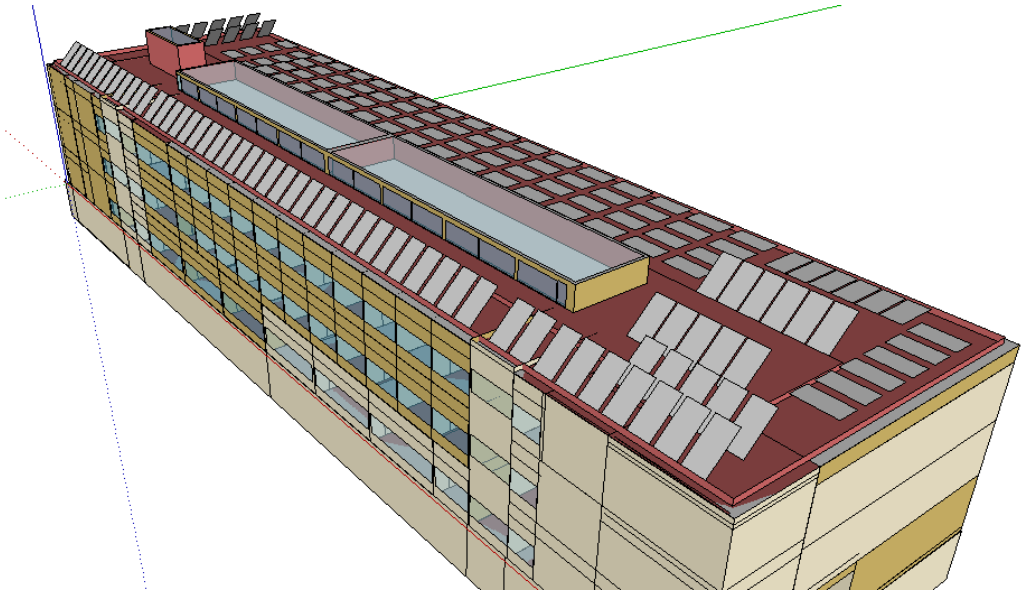


Figura 4.12 – Conjunto de painéis solares instalados na cobertura do Edifício X.

De igual modo, a distribuição geográfica do maior número/área de coletores deve ter em conta os períodos de pico ou maior carga do *chiller*, correspondendo normalmente aos períodos da tarde, a partir das 13 horas, quando a incidência solar está orientada a Sul.

Assim sendo, grande parte dos coletores solares foram instalados nessa orientação, ao longo da fachada poente.

A simulação efetuou-se para 3 dias típicos de vários meses nos quais o *chiller* se encontra em operação, observando-se a evolução da carga pedida ao equipamento de refrigeração e a produção térmica dos painéis solares.

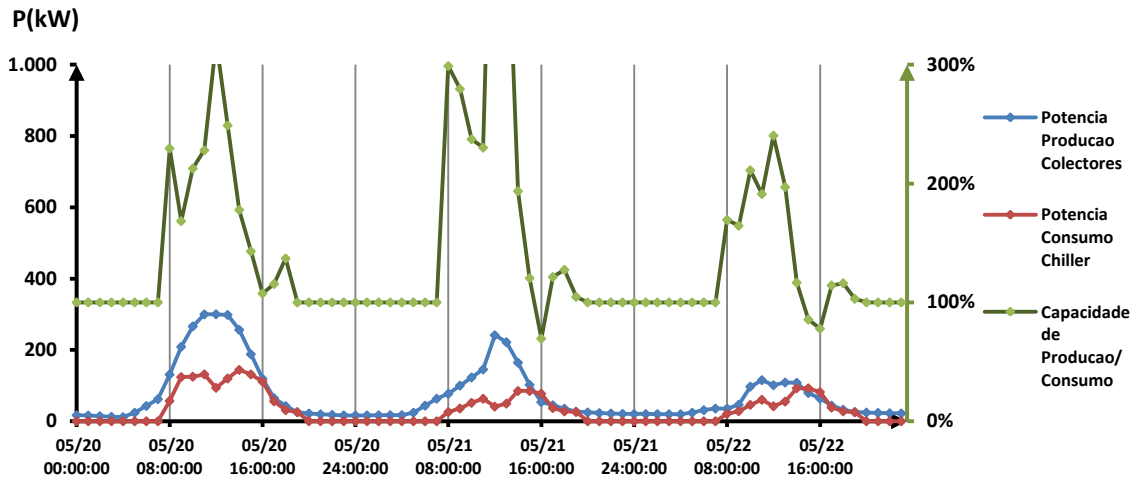


Figura 4.13 - Potência térmica dos coletores solares vs Consumo instantâneo do chiller para 3 dias típicos de Maio (20/05 a 22/05).

Durante o mês de Maio, para o período estudado, a potência térmica do conjunto dos coletores solares é suficiente para abastecer o consumo do *chiller* para quase todo o período. No entanto, existem períodos em que não é suficiente, sendo a carga máxima remanescente de ≈ 24 kW. Significa portanto que durante este período seria necessário recorrer aos sistemas auxiliares de *backup* integrados com os coletores, sendo que o tanque auxiliar de aquecimento teria de suportar uma potência térmica de pelo menos 24 kWt, o que implica uma potência elétrica superior, correspondente ao rendimento do sistema de aquecimento.

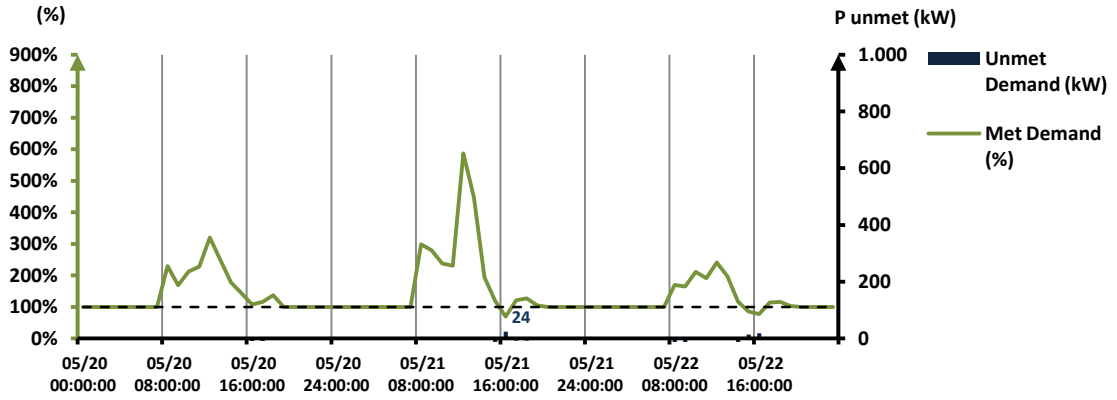


Figura 4.14 - Carga suplementar de aquecimento necessária por parte dos sistemas auxiliares (kW) para as várias horas do período de simulação (20/05 a 22/05).

Dos quatro meses considerados, o mais crítico em termos de desvios de carga foi o mês de Julho, registando-se períodos onde a potência térmica dos coletores solares cobria apenas ≈ 20% da carga necessária, necessitando-se da ativação dos sistemas auxiliares para cobrir os restantes 80%, representando no período de pico uma potência térmica da ordem dos 340 kWt.

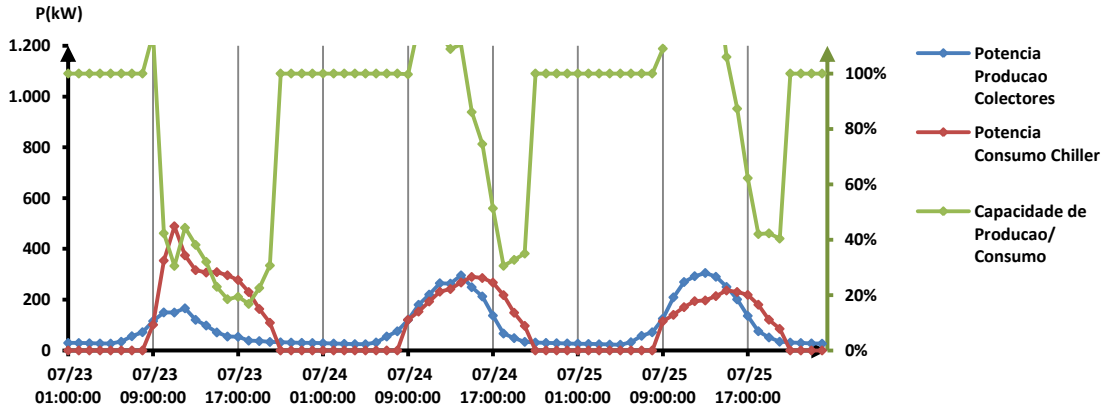


Figura 4.15 - Potência térmica dos coletores solares vs Consumo instantâneo do *chiller* para 3 dias típicos de Julho (23/07 a 25/07).

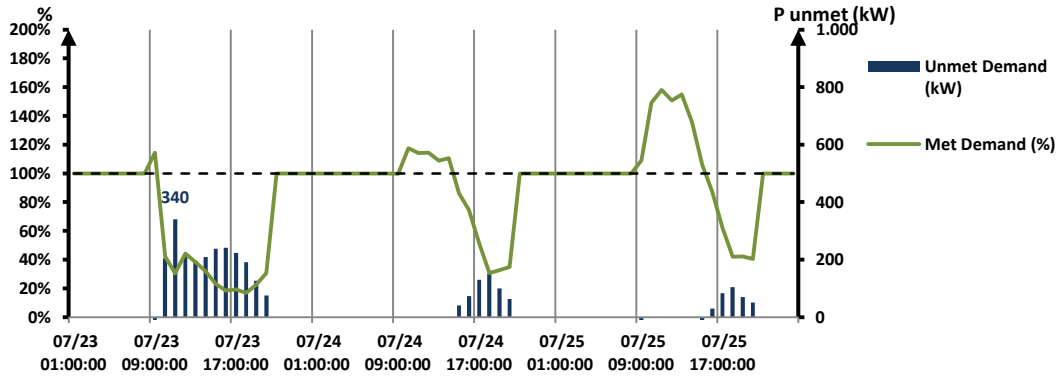


Figura 4.16 - Carga suplementar de aquecimento necessária por parte dos sistemas auxiliares (kW) para as várias horas do período de simulação (23/07 a 25/07).

Observa-se ao longo dos 5 meses uma tendência para não acompanhamento da carga nos períodos da tarde/fim de tarde, com principal relevo para os períodos compreendidos entre as 15 e as 17 horas. Desse modo, optou-se por redefinir a inclinação dos painéis solares virados para Sul e distribuídos ao longo da cobertura da fachada poente, ao invés de se optar pelo modo "*flat*".

Os resultados da simulação demonstram ligeiros ganhos de potência para os períodos anteriormente descritos, perdendo-se no entanto alguma capacidade térmica em períodos do dia menos críticos, nomeadamente até às 12/13 horas.

Tendo em conta que, após a reestruturação dos painéis solares, existem ainda períodos onde a capacidade térmica está longe da carga de consumo, optou-se por se alargar a área coletora, projetando-se a instalação de mais painéis limitados ao espaço de cobertura disponível.

Foram adicionados 48 coletores, perfazendo um total de 207 coletores solares, dispostos por uma área coberta total de $A_{colectores} \approx 614\ m^2$.

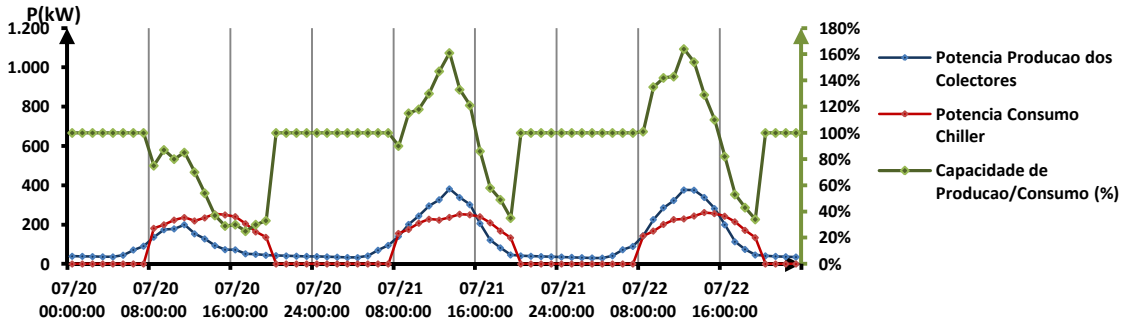


Figura 4.17 - Potência térmica dos coletores solares vs Consumo instantâneo do *chiller* para 3 dias típicos de Julho (20/07 a 22/07) e uma área coletora de 614 m^2.

De acordo com os resultados da simulação para este conjunto de coletores, continuam a existir períodos nos quais a capacidade térmica dos coletores não se aproxima sequer das necessidades de consumo, correspondendo a períodos onde o recurso solar é inexistente ou escasso, fator que por si só condiciona e inviabiliza a utilização do sistema de refrigeração recorrendo exclusivamente aos coletores solares.

Dada a impossibilidade de simular no *EnergyPlus* a integração do sistema como um conjunto produção/armazenamento/consumo e, consequentemente, analisar as capacidades de armazenamento do Sistema Solar térmico , torna-se inviável compreender e discutir até que ponto o sistema de armazenamento térmico compensa o défice do recurso solar e tem a capacidade de acompanhar o consumo do *chiller*. No entanto, tendo em conta que em alguns dos dias simulados a intensidade solar é bastante reduzida durante todo o período ativo do edifício ou por longos períodos, um sistema de armazenamento térmico deste tipo de tecnologia, com temperaturas de funcionamento abaixo dos 80ºC, não é capaz de funcionar às condições-padrão e assegurar o consumo durante esses períodos, sendo necessário recorrer a outro tipo de solução.

Desse modo, a carga remanescente tem de ser suportada por outro equipamento auxiliar, capaz de aquecer o fluxo de água proveniente dos coletores à temperatura de projeto.

A integração da caldeira a gás incorporada no sistema para ajuste da temperatura do fluido dos coletores, seria uma opção de otimização no que respeita a investimento e redução do consumo, tendo em conta que o funcionamento atual se restringe ao Inverno (para aquecimento ambiente).

No entanto, esta opção foi descartada devido às limitações do *software* e ao âmbito que se pretende para as soluções alternativas, conforme será descrito posteriormente.

A solução mais indicada para este tipo de situação, tendo em conta que existem bastantes períodos onde a escassez do recurso condiciona a capacidade de arrefecimento, é assegurar a disponibilidade de um sistema de arrefecimento dedicado e independente. A instalação de um *chiller* de absorção a funcionar sempre que as condições climatéricas o permitam deve ser compensado pela existência de um *chiller* elétrico a funcionar em paralelo, que deverá assegurar o arrefecimento das várias zonas em qualquer período.

A estimativa dos consumos de arrefecimento pode ser obtida simulando-se inicialmente o comportamento do *chiller* de absorção para todo o período em que se prevê arrefecimento, obtendo-se os períodos nos quais a carga/consumo não é satisfeita na sua totalidade. Nesses períodos, ter-se-ia de recorrer ao *chiller* elétrico e estimar os consumos daí provenientes a partir da simulação com esse equipamento.

Por outro lado, é possível de uma forma mais direta estimar os consumos provenientes de um sistema de aquecimento auxiliar acoplado aos painéis solares. Neste caso, toda a carga remanescente necessária seria suportada por este sistema. Nesse sentido, procedeu-se à simulação do sistema para o todo o período anual onde se prevê arrefecimento (entre Abril e Setembro), estimando-se as necessidades térmicas.

Ao consumo proveniente do sistema produtor de calor, deve-se adicionar todo o consumo consequente relativo aos sistemas auxiliares, nomeadamente o sistema de bombagem utilizado na recirculação do fluido, correspondente à bomba elétrica. O consumo total do sistema solar será então a referência tida como comparação com o consumo do sistema convencional na produção de frio.

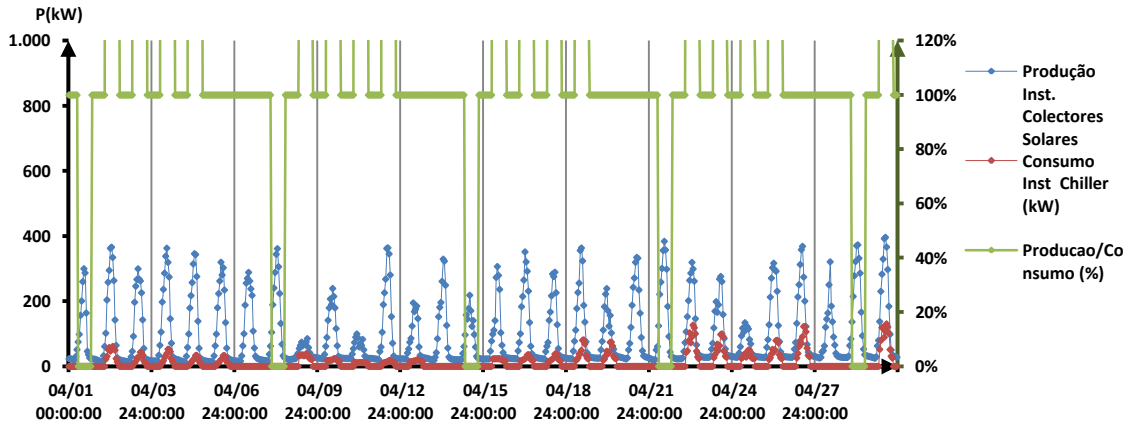


Figura 4.18 - Potência térmica dos coletores solares vs consumo instantâneo do *chiller* para o mês de Abril.

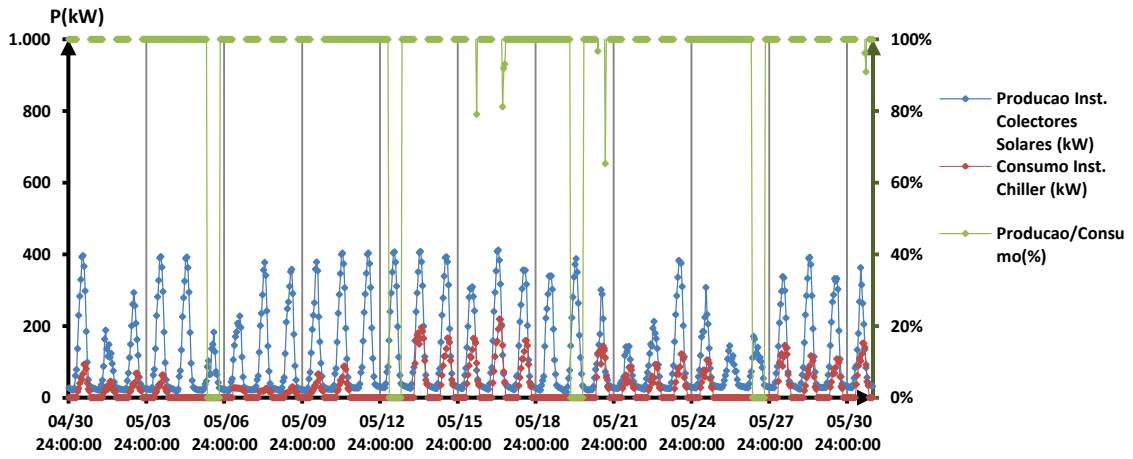


Figura 4.19 - Potência térmica dos coletores solares vs consumo instantâneo do chiller para o mês de Maio.

O sistema solar consegue corresponder plenamente às necessidades de refrigeração do edifício e ao consumo de água quente do *chiller* durante os meses menos quentes, especialmente Abril e Maio, conforme demonstram as figuras anteriores.

Durante estes meses, raros são os instantes em que é necessário recorrer a sistemas de *backup* para realizar o aquecimento. Por outro lado, nos meses mais quentes de Verão registam-se consumos bastante superiores, existindo períodos onde a capacidade de produção atinge apenas cerca de 30% das necessidades de consumo e existindo consequentemente uma dependência forte em relação aos sistemas de *backup*, cuja capacidade/potência deve ser elevada.

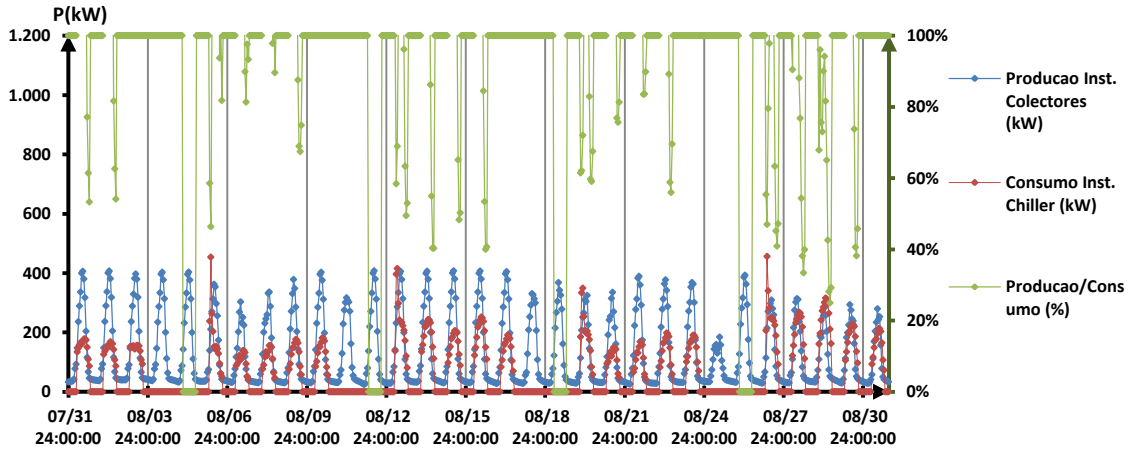


Figura 4.20 - Potência térmica dos coletores solares vs consumo instantâneo do chiller para o mês de Agosto.

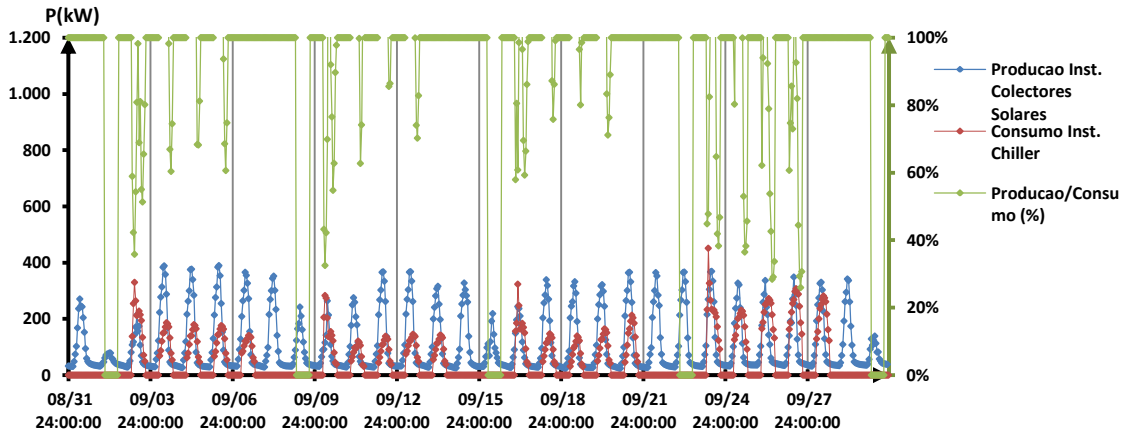


Figura 4.21 - Potência térmica dos coletores solares vs consumo instantâneo do *chiller* para o mês de Setembro.

As necessidades térmicas que não são satisfeitas pelo sistema solar, ao longo dos vários meses onde é necessário arrefecimento, estão representadas na **Figura 4.22**, em termos de energia térmica acumulada (MWh t) desde o inicio de cada mês. Os meses de Julho, Agosto e Setembro são aqueles onde se recorre mais ativamente aos sistemas de *backup*, totalizando um consumo térmico remanescente de aproximadamente 4,9 5,7 e 5,9 MWh t, respetivamente. O valor mais elevado para Setembro está inerente ao facto de a capacidade de produção dos coletores solares ser inferior ao dos outros meses devido à menor intensidade do recurso solar.

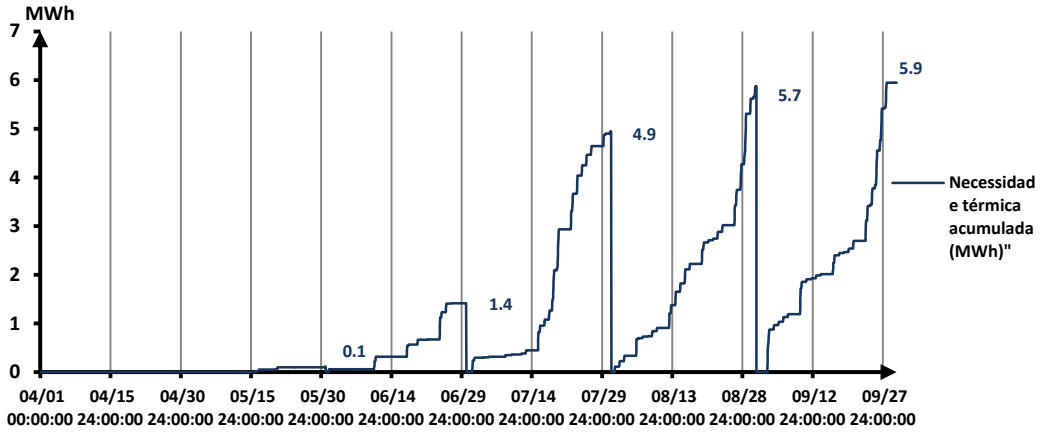


Figura 4.22 - Necessidades térmicas mensais acumuladas.

Conforme os critérios especificados, toda a carga instantânea que não é suportada na sua plenitude pelo *chiller* de absorção deverá sê-lo através do *chiller* elétrico. Assim sendo, determinou-se o consumo elétrico deste equipamento tendo em conta essas necessidades, ao longo de todo o período em que se recorre ao arrefecimento do edifício.

O gráfico abaixo representa essa evolução temporal com os valores de consumo acumulados para cada mês, totalizando um valor anual na ordem dos 9 MWh.

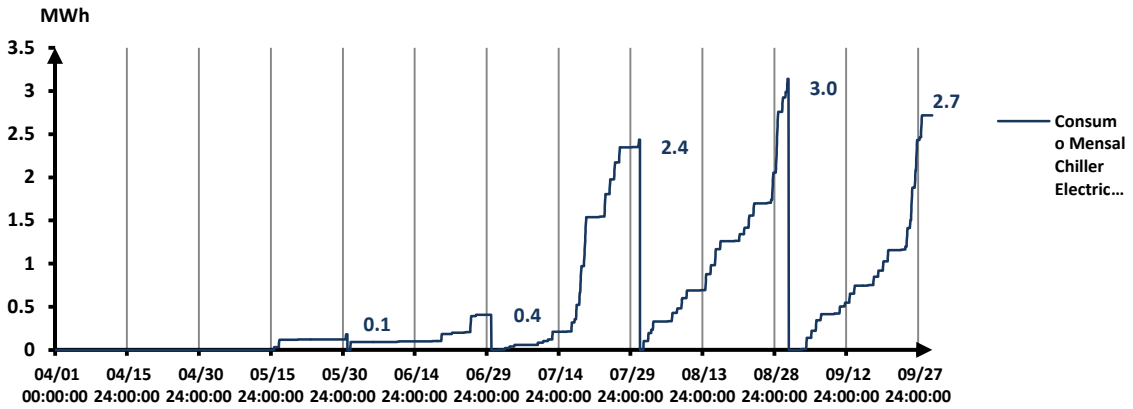


Figura 4.23 - Consumo elétrico mensal acumulado do chiller de compressão com o chiller de absorção off.

4.3.2.2 Ajuste da iluminação artificial em função da luz natural

Este sistema permite regular as necessidades instantâneas de iluminação e com isso evitar gastos supérfluos. Tendo em conta que os gastos em iluminação constituem uma parcela considerável no consumo energético de um edifício, parte desse desperdício pode ser evitado através de um sistema de ajuste.

O *software* permite vários tipos de configuração, podendo ser escolhido o nº de sensores ao longo de uma zona, o seu posicionamento e ainda que tipo de *dimming* é feito, podendo este ser:

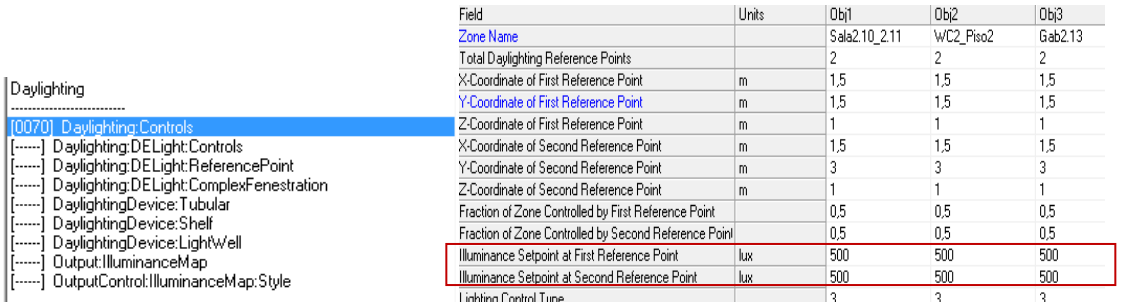
(i) *Contínuo* – O ajuste é feito continuamente tendo em conta a iluminação natural existente, i.e a intensidade luminosa decresce com o aumento da luminosidade natural de forma proporcional

(ii) *Faseado* – É definido um *setpoint* mínimo de luminosidade natural correspondente ao conforto visual para a zona, ao qual está associada uma necessidade de iluminação artificial nula. É definido um nº de escalões/níveis onde em cada um deles é ativada a carga luminosa fixa correspondente à iluminação artificial.

(iii) *On/Off* – Estabelece-se um valor fixo de luminosidade correspondente ao conforto visual. Sempre que esse valor é atingido, o sistema de iluminação é desligado, voltando a ser ligado quando esse valor baixar novamente. A ativação da carga luminosa é progressiva, obtendo-se a cada momento a iluminação artificial estritamente necessária para o conforto visual.

Optou-se por definir um sistema de ajuste do tipo *On/Off*, definindo-se um valor padrão de 500 lux para o conforto visual. Como forma de simplificação, este valor foi definido para as várias

zonas do edifício. Considerou-se a instalação de dois sensores por zona, colocados em localizações opostas. As condições mínimas de conforto visual devem ser verificadas para os dois pontos de medição, em qualquer instante.



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Zone Name		Sala2.10_2.11	WC2_Piso2	Gab2.13
Total Daylighting Reference Points		2	2	2
X-Coordinate of First Reference Point	m	1,5	1,5	1,5
Y-Coordinate of First Reference Point	m	1,5	1,5	1,5
Z-Coordinate of First Reference Point	m	1	1	1
X-Coordinate of Second Reference Point	m	1,5	1,5	1,5
Y-Coordinate of Second Reference Point	m	3	3	3
Z-Coordinate of Second Reference Point	m	1	1	1
Fraction of Zone Controlled by First Reference Point		0,5	0,5	0,5
Fraction of Zone Controlled by Second Reference Poinl		0,5	0,5	0,5
Illuminance Setpoint at First Reference Point	lux	500	500	500
Illuminance Setpoint at Second Reference Point	lux	500	500	500
Lighting Control Type		3	3	3

Figura 4.24 - Parametrização em *EnergyPlus* do sistema de ajuste de luminosidade para cada zona.

A simulação foi realizada conjuntamente integrando as duas medidas propostas anteriormente, sendo que o consumo do *chiller* pressupõe uma fonte geradora de calor permanentemente às condições *standard*.

Tabela 4.6 - Simulação do consumo anual do *Edifício X* com as medidas alternativas simuladas sem recorrer ao *chiller* eléctrico.

Equipamento	Consumo (kWh)	%
Chiller de Absorção	3 973	**1%**
Reservatório Solar Térmico[46]	0	**-**
Caldeira	8 832	**3%**
UTAN	8 045	**3%**
Ventiladores dos *Fan coils*	7 603	**3%**
Bombas[47]	34 705	**12%**
Iluminação	59 003	**21%**
Equipamento elétrico	155 836	**55%**
Ventilador da torre de refrigeração	4.263	**2%**
Total	**282 260**	

[46] Sistema sem aquecimento *backup*
[47] Inclui bombas do circuito de distribuição (frio e quente), bomba do circuito de condensação (torre de arrefecimento), bomba de distribuição de água dos CST e bomba de distribuição de água ao gerador do *chiller*

Tabela 4.7 - Consumo de Energia primária por tipo de fonte (sem recorrer ao *chiller* electrico).

Tipo	Fonte Primária	Energia Útil (kWh)	Energia Primária (kgep)
Aquecimento	Propano	8 832	760
Arrefecimento	Eletricidade	8 236	2 388
Bombas	Eletricidade	34 705	10 064
Ventilação	Eletricidade	15 648	4 538
Iluminação	Eletricidade	59 003	17 110
Equipamentos	Eletricidade	155 836	45 192
Total		**282 260**	**81 052**

$\boldsymbol{Q_{aq}} = \boldsymbol{Q_{caldeira}} \approx 8\,832\ kWh$

$\boldsymbol{Q_{arr}}$[48] $= \boldsymbol{Q_{chiller}} = 3\,973 + 4\,263 = 8\,236 kWh$ *(não satisfaz a carga na plenitude)*

De forma a satisfazer a carga, calcula-se o consumo global resultante da soma dos consumos para os períodos em que o *chiller* de absorção se encontra *on* e *off*, deduzindo ou contemplando o consumo das bombas elétricas dos dois sistemas e os próprios equipamentos de produção.

$$Q_{on} = \sum (Q_{chiller_{abs}}; Q_{bomba_{CST}}; Q_{bomba_{gerado}}; Q_{bomba_{chillerabs}})$$

$$Q_{off} = \sum (Q_{chiller_{elect}}; Q_{bomba_{chiler\_elect}})$$

$\boldsymbol{Q_{arr_{corrigido}}}$[49] $= \boldsymbol{Q_{arr}} + \boldsymbol{Q_{chiller\_elect_{ON}}} = 8\,236 + 8\,600 = 16\,836\ kWh$ *(teoricamente satisfaz a carga)*

$$\boldsymbol{Q_{out}} = Q_{bombas} + Q_{ventiloconvectores} + Q_{UTAN} + Q_{Ilum} + Q_{Equip}$$
$$\approx 34\,705 + 7\,603 + 8\,045 + 59\,003 + 155\,836 = 265\,192\ kWh$$

$\boldsymbol{Q_{out_{corrigido}}} =$

$Q_{out} + \left(Q_{bomba_{chillerelect_{ON}}} - Q_{bomba_{chillerabsOFF}} - Q_{bomba_{CST_{OFF}}} - Q_{bomba_{geradorchiller_{OFF}}} - Qbombatorre\_refrigOFF - Qfan\_torre\_refregOFF = 265\ 192 + 2\ 403 - 2\ 371 - 341 - 301 - 5341 - 987 = 258\ 254\ kWh\right.$

$A_p = 3329\ m^2$

---

[48] Sem correcção, i.e, sem recorrer ao *chiller* electrico
[49] Recorrendo ao *chiller* electrico quando a carga térmica dos colectores < carga de consumo do *chiller* de absorção

$$\boldsymbol{IEE}^{50} = \frac{760}{3329} \times 1 + \frac{2388}{3329} \times 1 + \frac{77\,904}{3329} \approx \mathbf{24 \rangle 15}\ (\boldsymbol{kgep}/_{\boldsymbol{m^2.ano}})$$

$$\boldsymbol{IEE_{corr}}^{51} = \frac{760}{3329} \times 1 + \frac{4\,883}{3329} \times 1 + \frac{74\,894}{3329} \approx \mathbf{24,2 \rangle 15}\ (\boldsymbol{kgep}/_{\boldsymbol{m^2.ano}})$$

Este valor, $IEE_{corr} = 24{,}2$, supera o valor máximo estipulado no RSECE para um edifício deste tipo, pelo que as medidas implementadas não seriam suficientes para torná-lo num edifício energeticamente eficiente. No entanto, tendo em conta que as cargas horárias de iluminação, e ocupação das zonas são definidas com base em critérios *standard* do RSECE, estas podem não corresponder na prática a esses valores.

De igual modo, aquando da execução do Projeto do edifício, a potência máxima de equipamentos elétricos dimensionada e tida em conta na altura pode não corresponder à realidade ou estar desajustada, tendo em conta que o nº de equipamentos e a atual tecnologia dos mesmos poderá resultar em níveis de consumo diferentes. O consumo relativo aos sistemas de iluminação foi bastante inferior ao consumo inicial com a instalação original, como seria de esperar, uma vez que o sistema de *dimming* permite reduzir esse consumo. Devido à falta de sensibilidade que se tem na avaliação das cargas horárias dos equipamentos elétricos, um segundo cenário utilizará o valor registado em 2008, que teoricamente estará mais próximo do padrão normal de consumo mas que, ainda assim, carece de representatividade.

[50] Sem recorrer ao *chiller* electrico
[51] Recorrendo ao *chiller* electrico

Tabela 4.8 - Consumo anual do *Edifício X* com as medidas alternativas (recorrendo ao *chiller* de absorção + eléctrico e redução na carga de equipamentos elétricos).

Equipamento	Consumo (kWh)	%
Chiller de Absorção	3 973	2%
Reservatório Solar Térmico[52]	0	-
Caldeira	8 832	4%
UTAN	8 045	4%
Ventiladores dos *Fan coils*	7 603	3%
Bombas[53]	27 767	15%
Iluminação	59 003	26%
Equipamento elétrico	98 000	44%
Ventilador da torre de refrigeração	4.263	2%
Total	**217 486**	

Tabela 4.9 - Consumo de Energia primária por tipo de fonte.

Tipo	Fonte Primária	Energia Útil (kWh)	Energia Primária (kgep)
Aquecimento	Propano	8 832	**760**
Arrefecimento	Electricidade	16 836	**4882**
Bombas	Electricidade	27 767	**8052**
Ventilação	Electricidade	15 648	**4538**
Iluminação	Electricidade	59 003	**17 111**
Equipamentos	Electricidade	98.000	**28420**
Total		**222 826**	**58 88112**

$$\boldsymbol{IEE_{corr}} = \frac{760}{3329} \times 1 + \frac{4\,882}{3329} \times 1 + \frac{59\,670}{3329} \approx \mathbf{19,4} \rightarrow \mathbf{15}\ (\frac{\boldsymbol{kgep}}{\boldsymbol{m^2.ano}})$$

4.3.2.3 Aplicação de sistemas de Proteção Solar

Apesar da incidência solar direta ter um papel fundamental na iluminação natural dos espaços, em certos casos pode traduzir-se num aumento significativo do consumo em arrefecimento e inclusivamente provocar níveis de desconforto visual e térmico nos ocupantes.

---

[52] Sistema sem aquecimento *backup*
[53] Inclui bombas do circuito de distribuição (frio e quente), bomba do circuito de condensação (torre de arrefecimento), bomba de distribuição de água dos CST e bomba de distribuição de água ao gerador do *chiller*

Nesta perspetiva, a recorrência exclusiva a vidros de alto desempenho, com películas de baixa emissividade (*low-E coatings),* não é uma estratégia de controlo solar que funcione isoladamente, uma vez que não limita os ganhos solares diretos, principalmente quando o sol está com uma elevação menor (orientação Poente e Nascente).

Assim, é aconselhável complementar a utilização de vidros de alto desempenho com sistemas de controlo solar, tais como o sombreamento interior, tratamento especial do envidraçado, telas ou sistemas de sombreamento exterior fixos/móveis. A estratégia adotada no que respeita ao tipo de sistema instalado depende das necessidades específicas de cada projeto e das condições locais, tais como o clima e a orientação solar do edifício [9].

Neste caso, as eventuais poupanças obtidas com a aplicação de um sistema de sombreamento automático ou recorrendo a sistemas com vidro de controlo solar recaem sobre o modelo original do Edifício, onde se pretende um impacto de redução ao nível do consumo em climatização, essencialmente no consumo em arrefecimento. Os ganhos provenientes desta medida podem posteriormente complementar os ganhos no consumo em iluminação artificial da medida anterior, refletindo-se numa aplicação conjunta que permita otimizações tanto a nível da iluminação como do arrefecimento elétrico.

Tendo em conta a orientação solar do Edifício X, considerou-se existir um grande potencial de redução no consumo de arrefecimento na fachada Nascente, zona dos gabinetes. Estas zonas, durante os períodos matinais do Verão, estão sujeitas a uma incidência solar intensa, contribuindo para os ganhos de calor internos por radiação, uma vez que não existe sombreamento. Por outro lado, os vidros duplos instalados não são refletores, factor que potencia o aumento desses ganhos. Durante o Inverno ocorre o oposto, os ganhos por radiação são desejáveis particularmente para os períodos da manhã, nos quais as temperaturas interiores são baixas devido à inatividade noturna do edifício (ausência de cargas internas e de controlo térmico) e a temperatura exterior mais baixa potencia perdas de calor pela envolvente. Assim, o ideal seria ativar um sistema de sombreamento durante o Verão e desativá-lo durante o Inverno, para as horas de funcionamento do edifício.

Nas zonas da fachada Poente, a incidência solar não é direta durante grande parte do ano, não estando estas zonas sujeitas a ganhos solares por radiação de forma tão intensa. Pode-se dizer com isto que o nível de aplicabilidade dos sistemas de sombreamento é bastante diferente nas duas fachadas, sendo bastante mais crítico na fachada Nascente.

No entanto, para a fachada Poente, os sistemas de sombreamento podem funcionar de forma alternativa como camada isolante, reduzindo as perdas térmicas no Inverno e os ganhos térmicos no Verão pelos vãos envidraçados, onde as trocas de calor se dão com mais intensidade, uma vez que a envolvente opaca possui materiais com características isolantes.

Seguidamente serão estudadas duas alternativas para efetuar o sombreamento das fachadas Nascente e Poente, a primeira utilizando exclusivamente tecnologia com vidros avançados de controlo solar e a segunda incluindo sistemas de sombreamento automático dos vãos.

Vidros avançados de controlo solar

De forma a tirar partido das soluções atualmente disponíveis no mercado, sugere-se como estudo a implementação de vãos envidraçados com capacidade termo crómica. Estes sistemas permitem ajustar a cor do vidro em função das condições térmicas nele presentes e, como tal, uma vez ativados, funcionam como elementos sombreadores, transmitindo para o interior das zonas os níveis de radiação pretendidos.

Este tipo de solução permite uma discriminação por tipo de radiação, de acordo com o seu comprimento de onda e a sua aplicação é ideal para situações onde se pretenda restringir os ganhos de calor (radiação solar térmica) ou radiações indesejáveis (infra vermelhos) sem comprometer os níveis de luminosidade interior (radiação solar visível), como é o caso.

Figura 4.25 - Exemplo de envidraçado termo crómico a funcionar nos regimes incolor e colorido.

O *EnergyPlus* permite esta aplicação sob a forma de um objeto *WindowMaterial:GlazingGroup:ThermoChromic*[54], que pode vir associado a outras camadas de vidros. Para tal, as características da película termo crómica, tais como coeficientes de transmissividade e refletividade solar e visível, variam em função da temperatura superficial do material e do comprimento de onda da radiação incidente.

[54] Exemplo disponível na biblioteca "*Example Files – Thermochromicwindow.idf*" do *EnergyPlus*

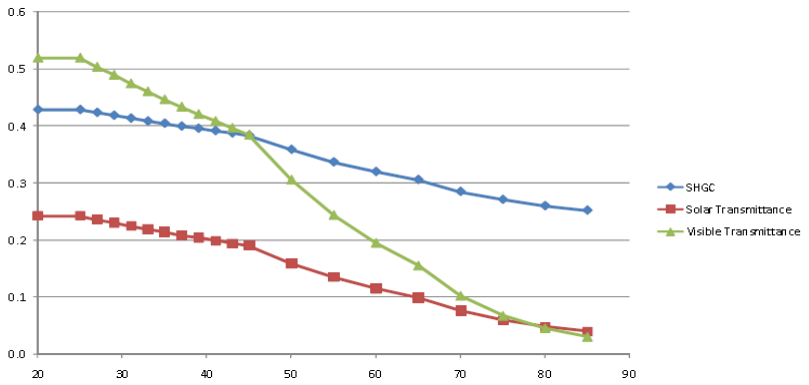


Figura 4.26- Propriedades da janela em função da temperatura n T(ºC) crómico [30].

Cada fabricante deve disponibilizar estas propriedades. O *EnergyPlus* possui uma base de dados com valores de referência que foram utilizados no modelo.

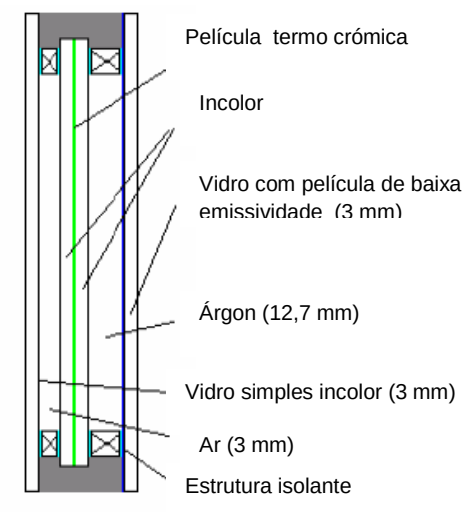


Figura 4.27 - Estrutura do vão envidraçado para as fachadas Nascente e Poente [43].

Tendo em conta a normal aplicação integrada em vãos de vidro duplo ou triplo, escolheu-se o sistema de três camadas referenciado na Figura 4.27, a instalar nas fachadas Nascente e Poente, considerado de alta eficiência térmica e referenciado em projetos inovadores de controlo solar, desenvolvidos pelo DOE.

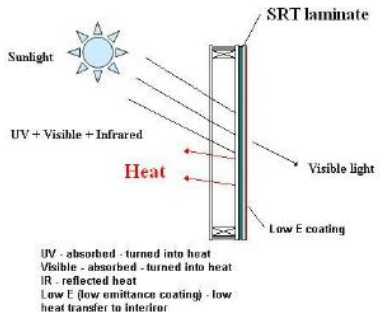


Figura 4.28 - Estrutura do vidro avançado de controlo solar termo crómico.

O sistema é composto por vidro termo crómico de controlo solar com *coating* de baixa transmissividade e foi simulado para toda a envolvente não opaca das fachadas Nascente e Poente [43.]

Tabela 4.10 - Estratégia de controlo solar simulada para as Fachadas Nascente e Poente – Simulação I.

Tecnologia	F. Nascente	F. Poente
Vidro termo crómico	√	√

Tabela 4.11 - Consumo por equipamento usando controlo solar termo cromático e ajuste da iluminação artificial.

Tipo	Equipamento	**Potência** (kW)	**Consumo** (kWh)
Arrefecimento	Chiller Eléctrico Ar/Água	361	37344
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	403	2086
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		6689
	Ventiladores		2711
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	52[55]	8961
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	59486
Equipamentos Eléctricos	Equipamento informático	-	155239
Total	-		**272 516**

Tabela 4.12 - Potencial de poupança energética em relação ao modelo original.

Equipamento/Consumo	Melhoria alternativa (kWh)	Projecto original (kWh)	Poupança energética (%)
Chiller eléctrico	37344	44508	**+ 16.1%**
Caldeira	2086	2497	+ 16.5%
UTAN	6689	5342	- 25.2%
Ventilo convectores	2711	2925	+ 7.3%
Bombas	8961	11169	+ 19.8%
Iluminação	59486	91336	**+ 34.9%**
Equipamentos eléctricos	155239	155239	-
Total	272 516	313 016	**+ 12.9%**

[55] Potência da bomba de distribuição de água arrefecida ($P_{elect.arref} = 24{,}6\ kW$) e Potência da bomba de distribuição de água quente ($P_{elect.aq} = 27{,}4\ kW$)

Analisando isoladamente as duas medidas, obtém-se:

Sistema de controlo solar

- Poupança de 8 235 kWh em arrefecimento[56] (≈ +13%)

- Poupança de ≈ 411 kWh em aquecimento (≈ + 16%)

Sistema de ajuste de iluminação

- Poupança de 31 850 kWh em iluminação (≈ + 35%)

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{179}{3329} + \frac{10830}{3329} + \frac{67595}{3329} = \mathbf{23,6} > \mathbf{15}$$

Fazendo a correção do consumo de equipamentos elétricos para o valor registado em 2008 de $C_{Eq.elect} = 98\ 000\ kWh$, obtém-se:

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{179}{3329} + \frac{10830}{3329} + \frac{50995}{3329} = \mathbf{18,6} > \mathbf{15}$$

<u>Sombreamento móvel automático com telas corridas</u>

Devido ao custo ainda elevado das tecnologias com vidros avançados de controlo solar, pode-se estudar uma alternativa para o sombreamento da fachada Poente, que não seja por uma via tão dispendiosa. Tendo em conta que o controlo solar na fachada Nascente é mais sensível a ganhos no consumo em arrefecimento, propõe-se a implementação de um sistema clássico[57] de sombreamento móvel automático exclusivamente para a fachada Poente, mantendo-se o sistema de vidros termo crómicos para controlo solar na fachada Nascente. Assim, sugere-se um sistema de ajuste utilizando telas móveis, auto controladas por um horário pré-definido que tem em conta tanto as oscilações térmicas sazonais como diárias. A otimização do sistema de sombreamento automático visa limitar os ganhos solares nos períodos quentes do Verão (durante o dia) e reduzir as perdas térmicas pelo envidraçado nos períodos de Inverno através da sua ativação.

---

[56] Inclui 7164 kWh de poupança no consumo do chiller; 2204 kWh no consumo da bomba eléctrica, 214 kWh no consumo dos ventilo-convetores e um aumento no consumo das UTAN de 1347 kWh

[57] Utilizando sistemas do tipo de tela corrida

O *EnergyPlus* permite a modelação deste sistema através de um objeto *WindowMaterial:Shade*[58]. Este tipo de equipamento é considerado um difusor perfeito onde a refletividade e transmissividade são independentes do ângulo de incidência da radiação. Assume-se que quando o sistema é ativado, a tela cobre toda a área do envidraçado, não existindo portanto sombreamento parcial. De igual modo, sempre que esteja desativado, considera-se que o envidraçado encontra-se totalmente exposto à radiação incidente. O período horário de ativação do sistema foi definido tendo em conta a orientação da fachada Poente e a posição do Sol (azimute e elevação) ao longo do ano e do dia, tendo-se sempre em consideração a dupla função do sistema.

Tabela 4.13 - Horário de funcionamento do sistema de sombreamento móvel considerado na simulação.

Estação/Horário	Noite	Dia
Inverno[59]	√	X
Verão[60]	x	√

Tabela 4.14 - Estratégia de controlo solar simulada para as Fachadas Nascente e Poente – Simulação II.

Tecnologia	F. Nascente	F. Poente
Vidro Termo crómico	√	
Sistema móvel automático com telas		√

Tabela 4.15 - Consumo por equipamento usando vidro termo crómico para a fachada Nascente, sombreadores móveis para a fachada Poente e ajuste da iluminação artificial.

Tipo	Equipamento	**Potência** (kW)	**Consumo** (kWh)
Arrefecimento	Chiller Eléctrico Ar/Água	355	35372
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	396	2228
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		6028
	Ventiladores		2711
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	51[61]	7983
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	57311
Equipamentos Eléctricos	Equipamento informático	-	155239
Total	-		**266 872**

[58] Disponível na biblioteca "*Data Sets- WindowShadeMaterials.idf* " do *EnergyPlus*
[59] Considera-se as datas de 01/10 a 31/03
[60] Considera-se as datas de 01/04 a 30/09
[61] Potência da bomba de distribuição de água arrefecida ($P_{elect.arref} = 24{,}2\ kW$) e Potência da bomba de distribuição de água quente ($P_{elect.aq} = 27{,}0\ kW$)

Tabela 4.16 - Potencial de poupança energética em relação ao modelo original.

Equipamento/Consumo	Melhoria alternativa (kWh)	Projecto original (kWh)	Poupança energética (%)
Chiller eléctrico	35372	44508	**+ 20.5%**
Caldeira	2228	2497	+ 10.8%
UTAN	6028	5342	- 12.8%
Ventilo convectores	2711	2925	+ 7.3%
Bombas	7983	11169	+ 28.5%
Iluminação	57311	91336	**+ 37.2%**
Equipamentos eléctricos	155239	155239	-
Total	266 872	313 016	**+ 14.7%**

Analisando isoladamente as duas medidas, obtém-se:

Sistema de controlo solar

- Poupança de 11 846 kWh em arrefecimento[62] (≈ +18%)

- Poupança de ≈ 269 kWh em aquecimento (≈ + 11%)

Sistema de ajuste de iluminação

- Poupança de 34 025 kWh em iluminação (≈ + 37%)

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{192}{3329} + \frac{10258}{3329} + \frac{66489}{3329} = \mathbf{23,1 > 15}$$

Fazendo a correção do consumo de equipamentos elétricos para o valor registado em 2008 de $C_{Eq.elect} = 98\,000\ kWh$, obtém-se:

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{192}{3329} + \frac{10258}{3329} + \frac{49890}{3329} = \mathbf{18 > 15}$$

<u>Sombreamento automático com estores de lamelas orientáveis para Fachada Nascente e Poente</u>

Foi igualmente estudada a solução de instalar sistemas móveis de sombreamento nas fachadas Nascente e Poente. Considera-se esta hipótese pois, em termos de implementação prática, pode ser uma solução mais vantajosa devido aos custos de investimento mais baixos.

[62] Inclui 9136 kWh de poupança no consumo do chiller; 3182 kWh no consumo da bomba eléctrica, 214 kWh no consumo dos ventilo-convetores e um aumento no consumo das UTAN de 686 kWh

Note-se que o software permite simular o sistema para ajustes em função de *triggers* opcionais pré-definidos, sejam eles relativos à radiação incidente, luminosidade ou temperatura do envidraçado. No entanto, o critério de ativação seguiu o modelo utilizado no caso anterior.

Tabela 4.17 - Estratégia de controlo solar simulada para as Fachadas Nascente e Poente – Simulação III.

Tecnologia	F. Nascente	F. Poente
Sistema móvel com estores de lamelas orientáveis	√	√

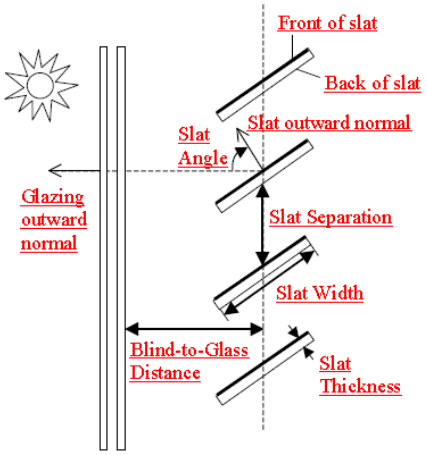


Figura 4.29 - Representação de um sistema de sombreamento móvel com lamelas horizontais *"louvres"* [30].

Tabela 4.18 - Consumo por equipamento usando estores móveis automáticos e ajuste da iluminação artificial.

Tipo	Equipamento	**Potência** (kW)	**Consumo** (kWh)
Arrefecimento	Chiller Eléctrico Ar/Água	360	35961
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	382	2189
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		6028
	Ventiladores		2744
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	51[63]	8103
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	57180
Equipamentos Eléctricos	Equipamento informático	-	155239
Total	-		**267 444**

[63] Potência da bomba de distribuição de água arrefecida ($P_{elect.arref} = 24{,}5\ kW$) e Potência da bomba de distribuição de água quente ($P_{elect.aq} = 26\ kW$)

Equipamento/Consumo	Melhoria alternativa (kWh)	Projecto original (kWh)	Poupança energética (%)
Chiller eléctrico	35961	44508	**+ 19.2%**
Caldeira	2189	2497	+ 12.3%
UTAN	6028	5342	- 12.8%
Ventilo convectores	2744	2925	+ 7.3%
Bombas	8103	11169	+ 27.5%
Iluminação	57180	91336	**+ 37.4%**
Equipamentos eléctricos	155239	155239	-
Total	267 444	313 016	**+ 14.6%**

Analisando isoladamente as duas medidas, obtém-se:

Sistema de controlo solar

- Poupança de 11 108 kWh em arrefecimento[64] (≈ +17%)

- Poupança de ≈ 308 kWh em aquecimento (≈ + 12%)

Sistema de ajuste de iluminação

- Poupança de 34 156 kWh em iluminação (≈ + 37%)

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{188}{3329} + \frac{10429}{3329} + \frac{66495}{3329} = \mathbf{23,2} > \mathbf{15}$$

Fazendo a correção do consumo de equipamentos elétricos para o valor registado em 2008 de $C_{Eq.elect} = 98\,000\ kWh$, obtém-se:

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{192}{3329} + \frac{10258}{3329} + \frac{49896}{3329} = \mathbf{18,1} > \mathbf{15}$$

<u>Sombreamento automático com estores de lamelas orientáveis para Fachada Nascente</u>

Nesta simulação, permite-se estimar o consumo aplicando a solução anterior apenas no envidraçado da fachada Nascente, reduzindo-se assim os custos de investimento necessários para o sombreamento da fachada que se considera mais crítica e com maior potencial de poupança.

[64] Inclui 8547 kWh de poupança no consumo do chiller; 3066 kWh no consumo da bomba eléctrica, 181 kWh no consumo dos ventilo-convetores e um aumento no consumo das UTAN de 686 kWh

Tipo	Equipamento	Potência (kW)	Consumo (kWh)
Arrefecimento	Chiller Elétrico Ar/Água	362	38400
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	310	2569
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		5658
	Ventiladores		2744
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	46[65]	8969
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	50233
Equipamentos Elétricos	Equipamento informático	-	155239
Total	-		**263 812**

Equipamento/Consumo	Melhoria alternativa (kWh)	Projeto original (kWh)	Poupança energética (%)
Chiller elétrico	38400	44508	**+ 13.7%**
Caldeira	2569	2497	- 2.8%
UTAN	5658	5342	- 5.9%
Ventilo convetores	2744	2925	+ 7.3%
Bombas	8969	11169	+ 19.7%
Iluminação	50233	91336	**+ 45%**
Equipamentos elétricos	155239	155239	-
Total	263 812	313 016	**+ 15.7%**

Analisando isoladamente as duas medidas, obtém-se:

Sistema de controlo solar

- Poupança de 8 173 kWh em arrefecimento[66] (≈ +13%)

- Aumento de ≈ 72 kWh no consumo de aquecimento (≈ + 3%)

Sistema de ajuste de iluminação

- Poupança de 41 103 kWh em iluminação (≈ + 45%)

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{221}{3329} + \frac{11136}{3329} + \frac{64625}{3329} = \mathbf{22,8 > 15}$$

[65] Potência da bomba de distribuição de água arrefecida ($P_{elect.arref} = 24{,}7\ kW$) e Potência da bomba de distribuição de água quente ($P_{elect.aq} = 21{,}2\ kW$)
[66] Inclui 6108 kWh de poupança no consumo do chiller; 2200 kWh no consumo da bomba eléctrica, 181 kWh no consumo dos ventilo-convetores e um aumento no consumo das UTAN de 316 kWh

Fazendo a correção do consumo de equipamentos elétricos para o valor registado em 2008 de $C_{Eq.elect} = 98\,000\ kWh$, obtém-se:

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{221}{3329} + \frac{11136}{3329} + \frac{48025}{3329} = \mathbf{17,8 > 15}$$

<u>Sombreamento automático com estores de lamelas orientáveis e vidros termo crómicos</u>

Tabela 4.19 - Consumo por equipamento usando vidro termo crómico para a fachada Nascente, sombreadores móveis para a fachada Poente e ajuste da iluminação artificial.

Tipo	Equipamento	**Potência** (kW)	**Consumo** (kWh)
Arrefecimento	Chiller Elétrico Ar/Água	355	33730
Aquecimento	Caldeira Gás Propano	396	2342
Ventilação/Ar novo	Unidades de Tratamento de Ar		6028
	Ventiladores		2711
Sistemas auxiliares	Bombas de preparação e distribuição	51[67]	7419
Iluminação	Lâmpadas fluorescentes interiores	-	64414
Equipamentos Elétricos	Equipamento informático	-	155239
Total	-		**271 883**

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{201}{3329} + \frac{9782}{3329} + \frac{68385}{3329} = \mathbf{23,5 > 15}$$

Fazendo a correção do consumo de equipamentos elétricos para o valor registado em 2008 de $C_{Eq.elect} = 98\,000\ kWh$, obtém-se:

$$\boldsymbol{IEE} = \frac{201}{3329} + \frac{9782}{3329} + \frac{51\,785}{3329} = \mathbf{18,6 > 15}$$

4.4 Ajuste do Horário de Funcionamento

Tendo em conta que o valor do consumo equivalente kgep/m^2 e respetivo Índice de Eficiência Energética se encontram acima do valor indicado no RSECE, tanto para o projeto original como para as medidas alternativas, podem existir parâmetros que justifiquem parte desses desvios.

i. Distribuição da intensidade de cargas internas para o período de funcionamento diário segue os padrões indicados no RSECE, para estabelecimentos de ensino

[67] Potência da bomba de distribuição de água arrefecida ($P_{elect.arref} = 24{,}2\ kW$) e Potência da bomba de distribuição de água quente ($P_{elect.aq} = 27{,}0\ kW$)

ii. Período de funcionamento anual do edifício considerado nas simulações abrange todo o ano civil, não contemplando as interrupções letivas que efetivamente ocorrem

O objetivo da simulação passa por aproximar-se da melhor forma possível das condições reais de funcionamento. Deste modo, a parametrização das cargas internas diárias induz à partida um fator de erro que não é conhecido e que varia anualmente. Esse fator poderia ser minimizado caso existissem dados históricos de ocupação, níveis de iluminação e de consumo elétrico, numa base horária.

Na impossibilidade de obter esses dados, é possível aproximar o período de funcionamento anual do edifício à realidade, uma vez que nas simulações anteriores foi considerado um funcionamento constante ao longo do ano e, como tal, sobre dimensionado o consumo global.

Tanto o projeto original como as medidas propostas foram simuladas novamente, tendo como base o calendário escolar, que representa de maneira aproximada o horário de funcionamento do edifício.

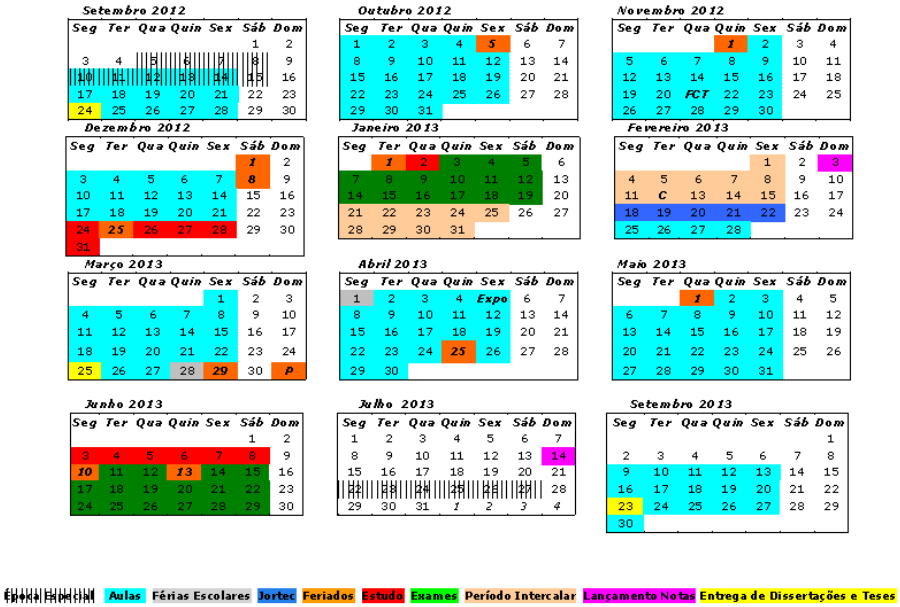


Figura 4.30- Calendário escolar da FCT-UNL (2012/2013) usado nas simulações.

Modelo original

$Q_{aq} = 5\,850\ kWh$

$Q_{arr} = 37\,197\ kWh$

$Q_{out} = 206\,644\ kWh$

$Q_{out_{corrigido}}$[68] $= 186\,236\ kWh$

$$IEE_{Proj.Original} = \frac{503}{3329} + \frac{10\,787}{3329} + \frac{59\,927}{3329} \approx 21$$

$$IEE_{Proj.Original_{corrigido}} = \frac{503}{3329} + \frac{10\,787}{3329} + \frac{54\,008}{3329} \approx 20$$

<u>Chiller de absorção e sistema de ajuste da iluminação artificial</u>

$Q_{aq} = 13\,621\ kWh$

$Q_{arr} = 3\,286\ kWh$

$Q_{out} = 221\,788\ kWh$

$Q_{out_{corrigido}}$[69] $= 200\,480\ kWh$

$$IEE = \frac{1171}{3329} + \frac{953}{3329} + \frac{64\,318}{3329} \approx 20$$

$$IEE_{corrigido} = \frac{1171}{3329} + \frac{953}{3329} + \frac{58\,139}{3329} \approx 18$$

<u>Sistema de controlo solar (vidro termo crómico em toda a envolvente) com ajuste da iluminação artificial</u>

$Q_{aq} = 5\,708\ kWh$

$Q_{arr} = 31\,269\ kWh$

$Q_{out} = 185\,458\ kWh$

---

[68] Considerando o consumo de 2008 em equipamento elétrico $Q_{eq.elect} = 98\,000 kWh$
[69] Considerando o consumo de 2008 em equipamento elétrico $Q_{eq.elect} = 98\,000 kWh$

$Q_{out_{corrigido}}$[70] $= 165\ 050\ kWh$

$$IEE = \frac{491}{3329} + \frac{9\ 068}{3329} + \frac{53\ 783}{3329} \approx 19$$

$$IEE_{corrigido} = \frac{491}{3329} + \frac{9\ 068}{3329} + \frac{47\ 864}{3329} \approx 17{,}2$$

<u>Sombreamento com telas corridas na fachada Poente e controlo solar termo crómico na fachada Nascente com ajuste da iluminação artificial</u>

$Q_{aq} = 5\ 692\ kWh$

$Q_{arr} = 29\ 280\ kWh$

$Q_{out} = 182\ 603\ kWh$

$Q_{out_{corrigido}}$[71] $= 162\ 195\ kWh$

$$IEE = \frac{489}{3329} + \frac{8\ 491}{3329} + \frac{52\ 955}{3329} \approx 18{,}6$$

$$IEE_{corrigido} = \frac{489}{3329} + \frac{8\ 491}{3329} + \frac{47\ 036}{3329} \approx 16{,}8$$

<u>Sombreamento com estores orientáveis na fachada Poente e controlo solar termo crómico na fachada Nascente com ajuste da iluminação artificial</u>

$Q_{aq} = 6\ 075\ kWh$

$Q_{arr} = 26\ 725\ kWh$

$Q_{out} = 185\ 917\ kWh$

---

[70] Considerando o consumo de 2008 em equipamento elétrico $Q_{eq.elect} = 98\ 000 kWh$
[71] Considerando o consumo de 2008 em equipamento elétrico $Q_{eq.elect} = 98\ 000 kWh$

$Q_{out_{corrigido}}$[72] $= 165\,508\ kWh$

$$IEE = \frac{522}{3329} + \frac{7\,750}{3329} + \frac{53\,915}{3329} \approx 18{,}7$$

$$IEE_{corrigido} = \frac{522}{3329} + \frac{7\,750}{3329} + \frac{47\,997}{3329} \approx 16{,}9$$

4.5 Avaliação económica das soluções

Nesta secção, será feita a análise económica ao sistema *chiller* de absorção e sistema de ajuste da iluminação artificial, bem como aos sistemas de protecção solar propostos.

(i) Instalação do SSAC composto por Coletores Solares Térmicos e *Chiller* de absorção

(ii) Instalação do sistema de controlo de luminosidade artificial

(iii) Instalação de sistemas de proteção solar

4.5.1 Sistema de Arrefecimento Solar

CAPEX (investimento inicial) por equipamento/serviço - I_0:

(i) *Chiller* de Absorção;
(ii) Sistema solar composto por 207 coletores solares térmicos;
(iii) Modernização da infraestrutura (tubagens, ligações, controlo do sistema)

Benefícios Anuais - B_n:

Custos de eletricidade evitados por não se recorrer ao *Chiller* elétrico a tempo inteiro;

Tempo de vida útil do projeto - n:

25 anos

Custos Anuais - C_n:

---

[72] Considerando o consumo de 2008 em equipamento elétrico $Q_{eq.elect} = 98\,000 kWh$

(i) Custos de O&M do Sistema de refrigeração solar;

(ii) Consumo elétrico do Sistema de refrigeração[73]

Nota: Para o estudo de investimento, foram considerados 2 cenários distintos, com base na informação obtida.

Cenário 1

O primeiro cenário baseia-se em informação recolhida em catálogos de fabricantes de equipamento. Considerando a instalação de um *Chiller* de Absorção com uma capacidade instalada de $\boldsymbol{P_{elec}}$ **= 580kW**, obteve-se uma estimativa dos custos de investimento e de manutenção recorrendo aos *guidelines* de um dos principais fornecedores norte-americanos deste tipo de instalações (Trane ®). Esta alternativa deveu-se ao facto de não existir informação disponível relativamente aos fornecedores nacionais destes equipamentos.

Tabela 4.20 - Preços de referência do fabricante Norte-americano Trane ® para *chillers* de absorção de efeito simples alimentados a água quente e aplicação para um *chiller* de capacidade $\boldsymbol{P_{nom} = 580\ kWe}$ [5].

		Preço Refª (US $/kW)	Preço final (US $)	Preço final (€)	% Investimento
CAPEX	*Chiller* de Absorção Efeito Simples	$100	$58.000	45.820 €	23%
	Instalação	$17	$9.860	7.789 €	4%
	Bombas	$335	$17.353[74]	13.709 €	7%
	Sistemas de controlo[75]	$13	$7.540	5.957 €	3%
	Outros componentes eléctricos[76]	$245	$142.100	112.259 €	57%
	Torre de arrefecimento	$ 30 / GPM[77]	$ 4.890[78]	3.863 €	2%
	Permutador de calor[79]	$13	$7.540	5.957 €	3%
	Total	$723	**$247.283**	**195.354 €**	-
OPEX	Custos O&M Anual	-	$2.473	1.953 €	1%

Para a integração dos CST no sistema, considerou-se o preço unitário de referência do modelo e marca utilizados na simulação (*Alternative Energy Technologies-32*) tendo em conta várias referências do mercado norte-americano. Os custos anuais de O&M, $C_{O\&M}$, bem como os

[73] De acordo com os custos de energia associados ao comercializador do mercado regulado (EDP SU)
[74] Potência dimensionada da bomba do circuito de distribuição de água fria $P_{bomba\_arref_{chiller.abs}} = 51{,}8\ kWe$
[75] Preço médio entre 9 e 18 US $ / kW
[76] Preço médio entre 130 e 360 US $/ kW
[77] Preço médio referenciado para a unidade *gallons per minute* GPM
[78] Caudal nominal dimensionado para o circuito de água de condensação da torre de arrefecimento = 0,0103 m^3/s
[79] Preço médio entre 8 e 17 US $/ kW

custos relativos aos equipamentos auxiliares (tanques de aquecimento e bombas), sistemas de controlo, infra-estrutura e montagem, foram assumidos como um percentual do custo dos CST.

Tabela 4.21 - Preços de referência do modelo de painéis solares AE-32 consultando vários fornecedores do mercado norte-americano.

	Componente	Preço Refª (US $/Unit)	Preço final (US $)	Preço final (€)
CAPEX	CST	$983[80]	$203.564	160.815 €
	Equipamentos auxiliares	≈ 10% CST	$20.356	16.082 €
	Sistemas de Controlo	≈ 1% CST	$2.036	1.608 €
	Infraestrutura e Instalação	≈ 20% CST	$40.713	32.163 €
	Total	-	-	**210.668 €**
OPEX		≈ 1% CAPEX (por ano)		2.107 €

Resultados

Para o cálculo dos benefícios anuais, B_n, considerou-se a poupança eléctrica proveniente da utilização conjunta dos *chillers* elétrico e de absorção ao invés da utilização recorrendo exclusivamente ao *chiller* elétrico.

Para esse cálculo, foi deduzido ao consumo total do *chiller* elétrico todo o consumo do *chiller* de absorção e auxiliares (torre de refrigeração, bomba elétrica do circuito que alimenta o gerador proveniente dos coletores solares) para os períodos em que a carga térmica é inferior à capacidade disponível, e o consumo do *chiller* elétrico nos períodos em que as cargas térmicas são superiores à capacidade de produção do sistema solar.

Tabela 4.22 - Consumo total do sistema de arrefecimento alternativo

Chiller electrico ON	**Consumo (kWh)**
Chiller electrico	8 600 kWh
Bomba distribuiçao água arrefecida	2 403 kWh
Chiller absorçao ON	
Chiller absorçao (auxiliares)	3 973 kWh
Bomba distribuiçao água arrefecida	6 728 kWh
Torre de arrefecimento (ventiladores)	3 244 kWh
Bomba distribuição CST (água aquecida)	1 226 kWh
Bomba distribuição água de condensação (torre arref)	17 550 kWh
Total	**43 724 kWh**

[80] Preço médio de referência de vários fabricantes (*benchmarking*)

$$\boldsymbol{B_n} = (\boldsymbol{E_{arref_{original}}} - \boldsymbol{E_{arref_{alternativo}}}) * €/\boldsymbol{kWh}$$

$$\boldsymbol{B_n} = E_{ch.elec.100\%} + E_{bomba_{ch.elect100\%}} -$$

$$\left(E_{ch.elect_{ON}} + E_{bomba_{ch.electrON}} + E_{ch.abs_{ON}} + E_{bomba_{ch.absON}} + E_{auxiliares_{ON}}{}^{81} + E_{bomba_{auxiliaresON}}{}^{82}\right) *$$

$$\frac{€}{\boldsymbol{kWh}} = 44\,509 + 11\,145 - 43\,724 = 11930\ (kWh) * 0{,}1595\ \left(\frac{€}{kWh}\right) = \boldsymbol{1903€/ano}$$

Tabela 4.23 - Valores usados como *input* para o cálculo do estudo de investimento para o sistema conjunto do SSAC constituído pelo *chiller* de absorção, CST e respetivos sistemas auxiliares.

Investimento inicial (SSAC)	Taxa de actualização	Taxa de inflação (IPC médio)	Incremento preço electricidade	Custo da electricidade por kWh (ano 0)	Benefícios anuais (ano 0)	Tempo de vida útil (anos)	Custos anuais
$I_0 = \boldsymbol{-406.022\ €}$	$i_n = 7\%$	$i_{IPC} = 2{,}5\%$	$C_{elect_i} = C_{elect_{i-1}} + 5\%$	$C_{elect_0} = 0{,}1595\ €/kWh$	$B_0 = \boldsymbol{1\ 903€}$	25	$C_{O\&M_n}$= 0,01*I_0 = $\boldsymbol{4.060}$ €

Com base nos valores, calcula-se o **Valor Atual Líquido**:

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0+C_0)*(1+i_{IPC})^n}{(1+i_n)^n}} = \textbf{-416 517 €}$$

Cálculo do valor da **Taxa Interna de Retorno**:

$$\boldsymbol{0 = I_0 + \frac{(B_0 + C_0) * (1 + i_{IPC})^{25}}{(1 + TIR)^{25}}}$$

$$\boldsymbol{TIR} = N/A$$

Mesmo considerando custos anuais de O&M iguais aos que atualmente se verifica, anulando portanto a parcela de $C_{O\&M_n}$, o investimento fica bastante aquém da rentabilidade económica:

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{B_0*(1+i_{IPC})^n}{(1+i_n)^n}} = \textbf{- 357 110 €}$$

$$\boldsymbol{TIR = N/A}$$

[82] $E_{bomba_{auxiliaresON}} = E_{bomba_{CST\_ON}} + E_{bomba_{Torrearrefecimento\_ON}}$

Tendo em conta que as referência de preços do fabricante de *chillers* para alguns dos componentes apresentam alguma margem , optou-se por considerar como cenário alternativo os valores mínimos referenciados, obtendo-se:

Tabela 4.24 - Preços mínimos de referência do fabricante Norte-americano Trane ® para chillers de absorção de efeito simples alimentados a água quente e aplicação para um chiller de capacidade P_nom=580 kWe [5].

		Preço Refª (US $/kW)	Preço final (US $)	Preço final (€)	% Investimento
CAPEX	*Chiller* de Absorção Efeito Simples	$100	$58.000	45.820 €	33%
	Instalação	$17	$9.860	7.789 €	6%
	Bombas	$335	$17.353	13.709 €	10%
	Sistemas de controlo	$9	$5.220	4.123 €	3%
	Outros componentes eléctricos	$130	$75.400	59.566 €	43%
	Torre de arrefecimento	$ 20 / GPM	$ 3.260[83]	2.575 €	2%
	Permutador de calor	$8	$4.640	3.665 €	3%
	Total	$723	**$173.733**	**137.247 €**	-
OPEX	Custos O&M Anual	-	$1.737	1.373 €	1%

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0 + C_0) * (1 + i_{IPC})^n}{(1 + i_n)^n} = -\,349\,908€}$$

$$\boldsymbol{TIR} = N/A$$

Considerando $C_{O\&M_n}$= 0:

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0 + C_0) * (1 + i_{IPC})^n}{(1 + i_n)^n} = -\,200\,003€}$$

$$\boldsymbol{TIR} = N/A$$

Realizando uma analise de sensibilidade, procedeu-se ao cálculo do valor máximo de investimento que rentabilizasse o projeto economicamente num período compreendido entre 5 e 10 anos, considerado como um prazo aceitável para este tipo de projetos.

Tabela 4.25 - Análise de sensibilidade ao valor do Investimento Inicial em função do Período de Retorno do investimento.

PR	5	6	7	8	9	10
$I_{0(€)}$	**€ 9 221**	**€ 11 098**	**€ 12 985**	**€ 14 884**	**€ 16 794**	**€ 18 715**
TIR (%)	29%	25%	22%	20%	18%	17%

[83] Caudal nominal dimensionado para o circuito de água de condensação da torre de arrefecimento = 0,0103 m^3/s

Analisando a **Tabela 4.25**, observa-se que o valor máximo de I_0 para um retorno a 10 anos é bastante inferior ao preço do equipamento relativo aos painéis solares térmicos ($P_{Paineis} = 160.815€$) ou ao preço do próprio *chiller* de absorção. Deste modo, mesmo considerando que existem custos que se poderiam evitar, quer a nível de instalação, sistemas auxiliares ou até mesmo sobre dimensionando o preço do *chiller* de absorção, o período de retorno do investimento estaria ainda assim bastante acima dos 10 anos, podendo nem ocorrer durante o tempo de vida útil do projeto.

Cenário 2

Neste caso, foram considerados dados históricos e estatísticos referenciados em documentos/relatórios de instituições internacionais de renome, mais concretamente a IEA que realiza estudos periódicos sobre tendências do sector, através de informação recolhida junto dos fabricantes e instaladores.

Foi realizado um estudo de *benchmarking* onde são indicados os custos médios de CAPEX para sistemas de arrefecimento solar. [24]

Tabela 4.26 – Análise de *benchmarking* ao preço dos Sistemas de Absorção e Sistemas Solares Térmicos [26].

	Relativo (por m2)			**Absoluto**		
Equipamento	Min	Max	Médio	Min	Max	Médio
Colectores Solares e Sist. Auxiliares	300 €	1.000 €	-	186.300 €	621.000 €	
Sistema de Absorção e Sist. Auxiliares	80 €	640 €	-	49.680 €	397.440 €	
CAPEX Total	**380 €**	**1.640 €**	**890 €**	**235.980 €**	**1.018.440 €**	**552.690 €**

Os dados da tabela anterior têm em conta uma multiplicidade de factores que originam custos bastante diferentes entre vários mercados. Os principais factores que potenciam essas disparidades são:

(i) Diferentes níveis de maturidade na indústria de equipamentos e economias de escala nos diversos países estudados;
(ii) Dentro da mesma indústria e tipo de instalação, são considerados projetos que utilizam equipamentos com diferentes níveis de eficiência/desempenho[84] e cuja distinção não é tida em conta;

[84] Caso dos *Chillers* de simples/ duplo/triplo efeito ou os colectores solares do tipo *Flat* / Tubos de vácuo

(iii) Diferentes medidas relativas a regime de incentivos regulatórios por parte dos governos no que respeita à produção de energia "limpa" (micro-geração);

Deste modo, existem diferenças de ≈ 300% entre preços para Sistemas Solares Térmicos e ≈ 800% entre Sistemas de Refrigeração que recorrem ao princípio da absorção. Verificando-se tais margens de disparidade, pode não ser representativo usar como referência um valor médio, podendo no entanto ser feita uma análise de sensibilidade.

Considerando o valor médio de $I_0 = -552.690€$, obtém-se:

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0+C_0)*(1+i_{IPC})^n}{(1+i_n)^n}} = \textbf{-503 778 €}$$

$$\boldsymbol{TIR} = N/A$$

Tendo em conta que no caso em estudo se trata de um sistema que não utiliza tecnologia de ponta (CST de menor eficiência do tipo *Flat-plate*, bem como um *chiller* de absorção de efeito simples), faz mais sentido considerar valores de investimento próximos do mínimo.

Assim, considerando um investimento inicial $I_0 = -235.980€$ e desprezando os custos anuais de O&M, obtém-se:

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0 + C_0) * (1 + i_{IPC})^n}{(1 + i_n)^n} = -187\ 068€}$$

$$\boldsymbol{TIR = N/A}$$

Nas melhores perspetivas, onde o preço mínimo se aplica ao sistema em estudo, obtém-se um valor final de 187 068 € de prejuízo, não se prevendo uma recuperação do investimento ao longo da vida útil do projeto.

4.5.2 Sistema de Ajuste da Iluminação Artificial

Cenário 1

Foi consultado um estudo de *benchmarking* [4] que indica o preço *standard* deste tipo de sistemas com base em modelos implementados em edifícios de escritórios nos EUA, sendo o preço referenciado em base absoluta (por balastro) ou relativa (por m^2).

Para efeitos de simplificação, optou-se por aplicar o preço relativo à área total de iluminação do edifício em estudo.

Tabela 4.27 - Custos de referência de sistemas de ajuste de iluminação por unidade e por área de acordo com o mercado norte-americano [4].

Custo (€/balastro)	Custo Relativo (€/m2)	Área iluminada (m2)	Custo Total estimado (€)
205	18,86	≈ 2000	**€37.720**

$$\boldsymbol{B_n} = (E_{ilum_{original}} - E_{ilum_{alternativo}}) * \frac{€}{kWh} = (91\,336 - 59\,003) * 0{,}1595 = 32\,333\ (kWh) * 0{,}1595 \left(\frac{€}{kWh}\right) = 5\,157€$$

Tabela 4.28 - Valores usados como *input* para o cálculo do estudo de investimento

Investimento inicial	Taxa de actualização	Taxa de inflação (IPC médio)	Incremento preço electricidade	Preço electricidade (ano 0)	Benefícios anuais (ano 0)	Tempo de vida útil (anos)	Custos anuais
$I_0 = -37.720\ €$	$i_n = 7\%$	$i_{IPC} = 2{,}5\%$	$C_{elect_i} = C_{elect_{i-1}} + 5\%$[85]	$C_{elect_0} = 0{,}1595\ € /kWh$	$B_0 = 5\,157€$	25	$C_{O\&M_n} \approx 0$[86]

Com base nos valores, obteve-se:

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0+C_0)*(1+i_{IPC})^n}{(1+i_n)^n}} = \mathbf{94\,843\ €}$$

$$\boldsymbol{TIR} \approx 21\%$$

$$\boldsymbol{PR} \approx 7{,}5\ anos$$

Tabela 4.29 - Análise de sensibilidade ao valor do Investimento Inicial em função do Período de Retorno do investimento

PR	5	6	7	8	9	10
$I_{0(€)}$	**€ 24 991**	**€ 30 078**	**€ 35 193**	**€ 40 339**	**€ 45 515**	**€ 50 721**

Analisando a tabela anterior e considerando os pressupostos, qualquer investimento neste tipo de sistema que seja inferior a $I_0 = 50\,000\ €$, gera um retorno nos primeiros 10 anos de operação.

[85] Referenciado pela ERSE como o valor limite dos incrementos anuais do preço de venda de energia eléctrica a clientes finais em BTN [17]
[86] Ver documento de Benchmarking 2003 "http://lighting.lbl.gov/pdfs/economic_considerations.pdf"

Cenário 2

Recorreu-se a uma base de dados reais *online*[87] para se retirar o preço médio de instalação e equipamentos deste tipo de soluções, com base em trabalhos adjudicados e implementados e, portanto, coerentes com a realidade da indústria.

Tabela 4.30 - Custos de referência de sistemas de ajuste de iluminação por unidade correspondentes a projectos reais implementados.

	Preço do Equipamento (unitário)	Mão de obra (total de horas)	Custos (total)
Sensor de luminosidade com ajuste automático	€ 113	€ 37	**€180**
Módulo de controlo	€ 250	€ 149	**€399**
Total	-	-	**€579**

Para o sistema completo, serão necessários 2 sensores de luminosidade por zona (condição simulada no *EnergyPlus*), controlados por um único módulo de controlo. Tendo em conta que a iluminação controlada foi simulada para 65 zonas, os custos totais do projecto segundo os pressupostos da **Tabela 4.3** são:

$$\boldsymbol{I_0 = 65 * (2 * 180€ + 1 * 399€) = 49.335€}$$

De acordo com este valor, bem como os dados da **Tabela 4.27**, estimar-se-ia neste caso um período de retorno a rondar os 10 anos, com uma TIR ≈ 17%.

4.5.3 Sistema de Controlo Solar com Tecnologia Termo crómica

Nesta análise, considera-se a instalação de vidros avançados termo crómicos para controlo solar, para todo o envidraçado a Nascente e Poente. Esta solução é analisada separadamente, sem contemplar os ganhos em iluminação, que dependem de um investimento extra na instalação do sistema de *dimming.*

Tabela 4.31 - Custo total estimado da instalação de vidros termo crómicos nas fachadas Poente e Nascente

Custo Relativo[88] (€/m2)	Área total do envidraçado (m2)	Custo Total estimado (€)
232 €	≈ 659 m^2[89]	**€152 888**

[87] Onde está reunida informação real relativa a serviços adjudicados e implementados nos EUA relativos a diversos tipos de material/equipamento e respectiva mão-de-obra – http://www.meanscostworks.com

[88] [47]

[89] $A_{janelas\_nascente} \approx 173\ m^2$; $A_{janelas\_poente} \approx 486\ m^2$

$$\boldsymbol{B_n}^{90} = (E_{envidraçado_{original}} - E_{envidraçado_{termo\ cromico}}) * \frac{€}{kWh} = 8\,235\ kWh * 0{,}1595 \frac{€}{kWh} \approx 1\,314\ €$$

Tendo em conta o investimento inicial necessário, as poupanças anuais são bastante reduzidas para que seja considerado um projeto economicamente viável, não se prevendo o retorno no investimento.

4.5.4 Sistema Híbrido com Sombreamento Automático e Controlo Solar Termo crómico

Nesta análise, considera-se a instalação de vidros termo crómicos de controlo solar para todo o envidraçado da fachada Nascente. Relativamente à fachada Poente, considera-se a instalação de um sistema de sombreamento móvel e automático de telas corridas.

Tendo em conta a dificuldade em encontrar informação oficial relativamente ao preço de referência para este tipo de sistemas de sombreamento, considerou-se um valor típico por unidade de área para o material e um valor típico por envidraçado para o resto do sistema de controlo motorizado, referenciados num artigo internacional por um especialista na área para o mercado Português [91]

Tabela 4.32 - Custo de investimento estimado para o sombreamento da fachada Poente [40].

	Custo Relativo	**Área total do envidraçado (m2) / Número de sistemas**	**Custo Total estimado (€)**
Material (F.Poente)	25 €/m^2	486 m^2	**12 150 €**
Controlo e Motor (F.Poente)	188 €/ sistema	72	**13 536 €**
Vidro termo crómico (F. Nascente)	232 €/m^2	≈ 173 m^2 [92]	**40 136 €**
Total			**65 822 €**

$$\boldsymbol{B_n}^{93} = (E_{envidraçado_{original}} - E_{envidraçado_{termo\ cromico}}) * \frac{€}{kWh} = 11\,846\ kWh * 0{,}1595 \frac{€}{kWh} \approx 1\,890\ €$$

[90] Por simplificação, não são considerados os ganhos económicos relativos à poupança no consumo em aquecimento, cujo valor é marginal relativamente ao arrefecimento
[91] [40]
[92] $A_{janelas\_nascente} \approx 173\ m^2$; $A_{janelas\_poente} \approx 486\ m^2$

Ainda que o custo de investimento seja consideravelmente menor que no cenário anterior, os custos bastante elevados do envidraçado termo crómico tornam o projeto economicamente inviável.

4.5.5 Sistema de sombreamento móvel automático para as fachadas Nascente e Poente

Este sistema contempla a solução baseada em estores auto controlados. Foi efetuado um estudo de *benchmarking* ao mercado Português para soluções de proteção solar, obtendo-se informação de um dos fabricantes de referência em Portugal, a CRUZFER[94]. O preço de referência foi obtido para sistemas de proteção solar baseados em estores de lamelas horizontais e auto orientáveis.

Tabela 4.33- Custo de investimento estimado para o sombreamento das fachadas Nascente e Poente.[48] [49].

	Custo Relativo	Área total do envidraçado (m2) / Número de estores	Custo Total estimado (€)
Material	55 €/m^2	659 m^2	**36 245 €**
Comando Central	-	118	**17 000 €**
Total			**53 245 €**

$\boldsymbol{B_n}$[95] $= (E_{envidraçado_{original}} - E_{envidraçado_{sombreamento\_Nascente\_Poente}}) * \frac{€}{kWh} = 11\,108\ kWh *$ $0{,}1595\,\frac{€}{kWh} \approx 1\,772$ €

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0+C_0)*(1+i_{IPC})^n}{(1+i_n)^n} = -6\,658\ €}$$

$$\boldsymbol{TIR} \approx 6\%$$

O projeto não é viável nas condições tomadas como referência, não sendo espectável a recuperação do investimento no final dos 25 anos de vida útil.

---

[93] Por simplificação, não são considerados os ganhos económicos relativos à poupança no consumo em aquecimento, cujo valor é marginal relativamente ao arrefecimento
[94] [48]
[95] Por simplificação, não são considerados os ganhos económicos relativos à poupança no consumo em aquecimento, cujo valor é marginal relativamente ao arrefecimento

4.5.6 Sistema de sombreamento móvel automático para a fachada Nascente

Os preços de referência anteriores foram aplicados apenas ao sombreamento da fachada Nascente, com uma área de envidraçado bastante inferior à fachada Poente.

Tabela 4.34- Custo de investimento estimado para o sombreamento da fachada Nascente [48] [49].

	Custo Relativo	Área total do envidraçado (m2) / Número de estores	Custo Total estimado (€)
Material	55 €/m^2	173 m^2	**9 515 €**
Comando Central	-	46	**6 630 €**[96]
Total			**16 145 €**[97]

$\boldsymbol{B_n}$[98] $= (E_{envidraçado_{original}} - E_{envidraçado_{sombreamento\_Nascente}}) * \frac{€}{kWh} = 8\,173\ kWh * 0{,}1595\,\frac{€}{kWh} \approx$ $1\,304$ €

$$\boldsymbol{VAL = I_0 + \sum_{n=1}^{25} \frac{(B_0+C_0)*(1+i_{IPC})^n}{(1+i_n)^n} = \textbf{17 364 €}}$$

$$\boldsymbol{TIR} \approx 14\%$$

$$\boldsymbol{PR} \approx 12{,}5\ anos$$

Com os pressupostos tomados, prevê-se que o retorno do investimento possa ser alcançado a meio do tempo de vida útil do projeto, entre os 12 e os 13 anos. No entanto, alguns custos acrescidos podem adiar esse retorno, nomeadamente custos de infraestrutura de ligação de cabos elétricos na comunicação entre comando central e motores e possíveis custos de manutenção dos sistemas ao longo da sua vida útil.

[96] Ao orçamento total de 17 000€ para o número de estores a controlar nas 2 fachadas, aplicou-se proporcionalmente o número de estores da fachada Nascente.
[97] Não é incluído o preço da tubagem nem cablagem de alimentação aos estores e cabos de sinal
[98] Por simplificação, não são considerados os ganhos económicos relativos à poupança no consumo em aquecimento, cujo valor é marginal relativamente ao arrefecimento

5. Discussão

No presente trabalho, as ferramentas de modelação e simulação utilizadas demonstraram ser bastante robustas e completas, dentro do respetivo âmbito e fim a que se destinam.

Concretamente, o *software Google SketchUp,* além de possuir uma interface bastante *user friendly* que permite ao utilizador identificar e executar de forma rápida e simples as suas funções, é também bastante flexível na medida em que, sendo um *software* principalmente orientado para outros fins, permite a integração dinâmica com outras aplicações, no caso concreto com a ferramenta de simulação energética, *EnergyPlus.*

A modelação gráfica do *Edifício X* exigiu a leitura detalhada de todas as superfícies dos diversos espaços a partir do *AutoCAD*, num processo que envolveu cruzamento de várias medidas em ficheiros distintos. Entrar no esquema de modelação a partir da visualização de plantas e cortes de fachadas de um Edifício com mais de 3000 m^2 de área e mais de 70 espaços individuais foi portanto um processo progressivo de aprendizagem, tendo em conta a falta de experiência nesse campo.

A ferramenta de simulação energética, *EnergyPlus,* é uma ferramenta pouco interativa, bastante "pesada" e complexa de manusear. De modo a perceber sua estrutura/organização e a forma como é feita a integração dos vários equipamentos foi necessário recorrer intensivamente tanto aos manuais de utilizador do *software* como aos documentos técnicos "*Lectures"* que o DOE disponibiliza.

No entanto, a multiplicidade de opções no que respeita a tipo de equipamentos, modelos, modos de integração, intervalos de amostragem, visualização de *outputs* e elevado poder de cálculo, entre outros, justifica o facto de ser uma ferramenta usada a nível institucional que serve de referência a grandes projetos internacionais de simulação energética.

Apesar de servirem como base de apoio para sustentar e viabilizar projetos de climatização em edifícios, as simulações energéticas, apesar do rigor no cálculo, não representam o grau de fiabilidade que muitas vezes se admite. Mesmo em ferramentas robustas e conceituadas como é o caso do *EnergyPlus,* a multiplicidade de *inputs* necessários para simular um sistema de tamanha dimensão, onde parte deles são difíceis de estimar (ocupação, comportamento dos utilizadores, condições climatéricas, etc) e onde pequenas diferenças entre esses *inputs* e as condições reais se refletem em grandes variações nos *outputs,* contribuem para o desfasamento entre resultados reais e teóricos.

No caso deste projeto, os balanços térmicos internos são bastante influenciadas pelas cargas sensíveis, tendo-se testado vários níveis de ocupação horária, cargas de iluminação e cargas de equipamentos, com resultados consideravelmente diferentes no que respeita a consumos dos equipamentos AVAC e, consequentemente, consumo geral do Edifício. Deste modo, a

melhor maneira de mitigar diferenças passa por integrar nos modelos de simulação dados históricos, se possível baseados em horizontes temporais representativos.

O *EnergyPlus* permite apenas modelar zonas específicas, não tendo sido considerada nas simulações a carga luminosa existente nas zonas de circulação comum, pelo facto de não existir ocupação permanente nem equipamentos de climatização instalados e, como tal, não ser considerada uma zona de condicionamento térmico, tal como indicado no Projeto de Execução [16]. Deste modo, é possível existirem alguns desvios no que respeita ao consumo energético registado na simulação e o consumo real do edifício, devido a esse efeito.

Os valores considerados para cargas horárias de equipamentos elétricos, aplicados na simulação e já revistos relativamente aos valores indicados no RSECE, refletem-se em consumos com um peso bastante elevado no *mix* global do edifício e comparativamente com os dados reais de 2008, referenciando a auditoria realizada na dissertação de *Santos, 2010* [35]. Na tentativa de mitigar ao máximo as imprecisões relativas a essas cargas, difíceis de prever devido à natureza e número de aplicações no edifício, decidiu-se utilizar para o estudo de investimento os valores reais de 2008 para consumo deste tipo de equipamento.

A simulação inicial foi feita tendo em consideração o ano civil e não o ano escolar, fator que por si só condiciona bastante os valores dos consumos. Optou-se por esta abordagem uma vez que se pretendia com a simulação do edifício assegurar um regime sazonal no comportamento do mesmo, e dimensionar consumos e capacidades de equipamentos para períodos de Inverno e Verão em condições semelhantes, a nível de cargas internas equivalentes. Assim, é normal que um edifício que apresenta cargas internas substancialmente inferiores durante períodos quentes (Julho e Agosto) devido às interrupções escolares, tenha consumos em arrefecimento bastante inferiores, passando-se o mesmo durante o Inverno para o consumo em aquecimento. Com esta abordagem, limita-se o risco de sub dimensionamento dos sistemas de climatização, contemplando os períodos de vazio como a plena carga e capacitando os equipamentos produtores de suportarem cargas mais elevadas, quando assim lhes for exigido. Por outro lado, com vista a obter níveis de consumo mais próximos da realidade, simulou-se o comportamento dos sistemas de acordo com os períodos de funcionamento real do edifício, recorrendo-se ao calendário escolar. Como consequência, o valor do consumo equivalente refletido no Índice de Eficiência Energética é relativamente mais baixo.

Os valores de caudal de ar novo mínimo a insuflar nas diversas zonas contemplado no Projeto de Execução e na simulação é feito a partir das duas UTAN instaladas na cobertura do edifício e cumpre com os requisitos mínimos do RSECE ($m^3/(ocupante.h)$) para cada zona em particular, contribuindo para a Qualidade do Ar Interior. O valor obtido na simulação do modelo original do Edifício para o Índice de Eficiência Energética excede o valor limite imposto pelo RSECE ($IEE = 22\ kgep/m^2$.ano face a $IEE = 15\ kgep/m^2ano$.), considerando um regime de funcionamento tendo como base o ano civil. Considerando o ano escolar, o valor reduz-se para $IEE = 20\ kgep/m^2ano$.

No que respeita a alternativas para a melhoria da eficiência energética, optou-se por não se estudar o efeito de medidas no lado do aquecimento, que apesar de possuir margens de melhoria, pouco contribuiria para reduzir substancialmente o consumo global. Os dois campos onde se considera existirem maiores margens de melhoria são o arrefecimento e a iluminação.

A **Figura 5.1** representa as várias estratégias que poderiam ser adotadas com vista a aumentar a eficiência energética do Edifício por via da redução no consumo em arrefecimento ambiente. O arrefecimento pode ser feito com consumos bastante inferiores a partir das tecnologias que hoje existem no mercado, destacando-se em particular os sistemas de absorção que se encontram numa fase mais madura e disseminada, relativamente a sistemas de adsorção e evaporação dessecante, sendo a única barreira os custos ainda elevados desse tipo de sistemas. Uma medida que não foi estudada mas que poderia fazer sentido seria a produção de água fria por parte de um *chiller* de absorção alimentado por uma caldeira de água quente ou a vapor, sendo que nesse caso poder-se-ia aproveitar a caldeira atualmente existente para aquecimento no Inverno e fonte geradora de calor para arrefecimento no Verão. No entanto, esta medida não vai de encontro ao objetivo conjunto que se pretende com a eficiência energética para os edifícios do futuro, onde se perspetiva que as reduções no consumo sejam acompanhadas por incrementos na capacidade de fontes renováveis com vista à redução das emissões de CO_2 e autonomia em relação aos combustíveis fósseis. Por outro lado, uma das desvantagens do próprio *EnergyPlus* prende-se com o facto de ser bastante complexo integrar em dois sistemas / *loops* diferentes um mesmo equipamento, o que restringe a simulação da mesma caldeira a funcionar nesse regime.

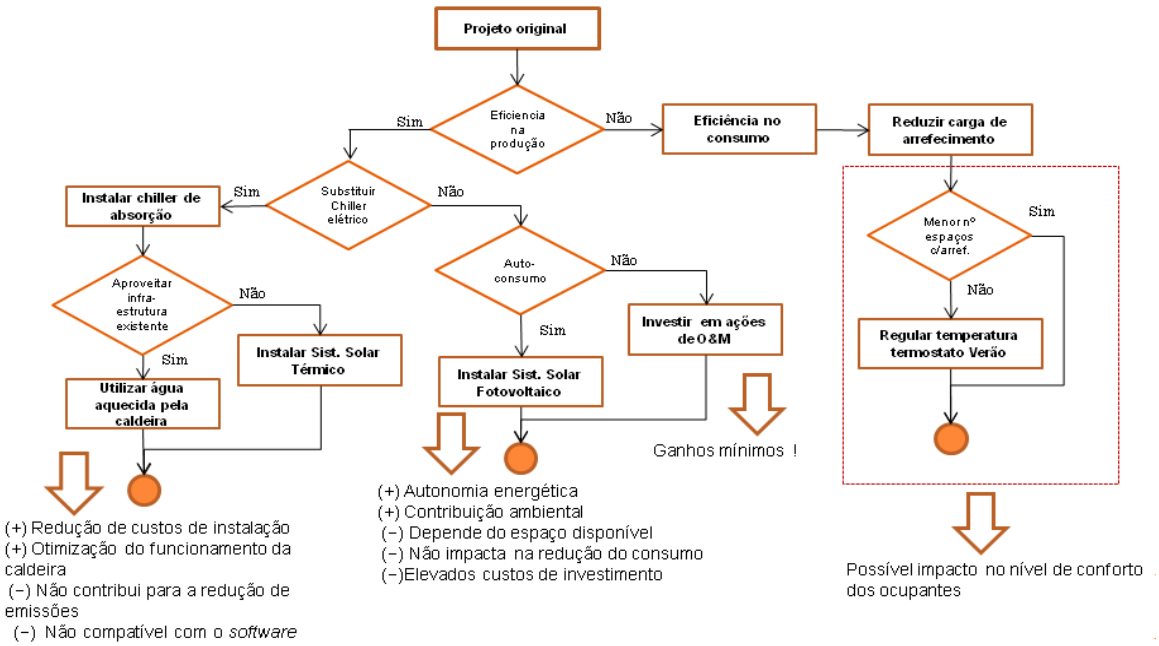


Figura 5.1 – Estratégias possíveis para reduzir o consumo em arrefecimento ambiente.

Como medida alternativa, foi ponderado o estudo da instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura do edifício, cuja eletricidade produzida alimentaria o atual *chiller* elétrico, tendo-se excluído a sua análise devido ao facto de que, apesar de poder trazer benefícios a nível da fatura elétrica e emissões de CO_2, não contribui para a diminuição do consumo bruto do edifício, apenas altera a sua fonte de produção o que, para efeitos do RSECE, não tem qualquer efeito.

A alternativa que se considerou mais sustentável trata-se de um sistema de arrefecimento baseado num Sistema Solar de Ar Condicionado, através da instalação de um *chiller* de absorção alimentado por uma fonte de água quente proveniente de um conjunto de coletores solares térmicos instalados na cobertura do edifício. A análise de investimento contemplou um sistema conjunto, com um *chiller* de absorção a funcionar como *base load* nos períodos em que a carga térmica dos CST é suficiente para alimentar o *chiller* às condições standard e o atual *chiller* elétrico a funcionar nos restantes períodos. No entanto, a sua análise técnica e económica permitiu concluir que o preço atualmente praticado para instalação deste tipo de sistemas é bastante elevado e a poupança anual em eletricidade em relação ao consumo atual não é substancial. Por outro lado, a implementação de sistemas baseados em controlo de iluminação artificial como possível aproveitamento da orientação solar do Edifício e da sua iluminação natural revelou algum potencial de aplicabilidade. Igualmente, o estudo de sistemas de proteção solar que visem a redução das necessidades de arrefecimento revelou-se uma alternativa interessante, principalmente para as zonas da fachada Nascente.

No que respeita a medidas alternativas para aumento do desempenho energético do edifício, estimou-se um investimento global no Sistema Solar de Ar Condicionado, incluindo equipamentos auxiliares e instalação, de ≈ 400 k€, face a poupanças residuais em eletricidade de ≈2 k€, representando ainda assim uma redução de aproximadamente 20% no consumo de arrefecimento do edifício. A área bruta da cobertura do edifício, considerando que todo o espaço está disponível, não é suficiente para acomodar a área de painéis solares que satisfaz os requisitos do *chiller* de absorção na sua plenitude, ou seja, sem recorrer a fontes de *backup* de forma intensiva. Assim, a simulação contemplou a área coletora máxima possível de instalar na cobertura do edifício (≈ 614 m^2 de CST) , recorrendo ao modelo gráfico em *Google SketchUp* e os resultados demonstram que existem períodos diários onde a capacidade térmica do conjunto de coletores satisfaz apenas cerca de 30% da carga de consumo do *chiller*. Por outro lado, nos meses menos quentes do período de arrefecimento, praticamente todas as necessidades são satisfeitas pela capacidade dos coletores. Nos períodos em que a produção térmica não é suficiente para abastecer a totalidade do consumo, o *chiller* elétrico entra em funcionamento, tendo sido contabilizado esse consumo adicional no cálculo das poupanças energéticas.

O estudo de investimento contemplou dois cenários, o primeiro no qual são aplicados os custos indicados pelos fabricantes destes equipamentos (para o *chiller* e para os painéis solares) e o

segundo no qual os *inputs* para o investimento inicial são retirados de estudos elaborados pela IEA, baseados em dados históricos reais, em parte devido à dificuldade em obter-se valores de referência no mercado nacional, por não existem estudos/dados públicos com valores indicativos. Ambos os cenários inviabilizam a instalação do sistema, justificando-se principalmente pelas reduzidas poupanças elétricas anuais face ao investimento inicial necessário. O projeto sairia mais beneficiado no caso em que os *setpoints* de conforto térmico $T_{ref} = 25/26$ºC fossem mais baixos (23ºC/24ºC), como se registou em simulações paralelas, não existindo ainda assim um retorno de investimento aos preços atualmente praticados para os equipamentos. De igual forma, o projeto poderia ser mais interessante no caso de se alargar a área climatizada para arrefecimento, por via do aumento do número de zonas/espaços condicionados, no caso de se considerar o arrefecimento ambiente para a zona de circulação comum, cave e/ou outras zonas.

Constatou-se que a potência de arrefecimento dimensionada na simulação para o *chiller* elétrico excede a potência dimensionada no Projeto de Execução do edifício. O mesmo acontece para a Potência de aquecimento da caldeira [16].

Na segunda medida alternativa estudou-se a instalação de um sistema de *dimming/* ajuste e controlo da iluminação artificial nas várias zonas do edifício, contemplando-se dois cenários distintos para o estudo de investimento, um deles baseado em estudos de *benchmarking* ao mercado da iluminação nos EUA e outro que contempla soluções reais implementadas. Na simulação através do *EnergyPlus,* o controlo da iluminação é feito de forma integrada entre as várias zonas, simulando um sistema de controlo central que atua diretamente os balastros das várias zonas com os níveis de iluminação necessários. Do ponto de vista técnico, não foi estudada a adequabilidade dos balastros existentes a tal sistema, sendo um ponto importante a considerar no caso de implementação prática, que pode encarecer e inclusivamente inviabilizar o projeto por via da substituição dos balastros. Contrariamente à alternativa anterior, ambos os cenários apontam para períodos de retorno a rondar os 10 anos (menos de 8 anos no primeiro e 10 anos no segundo), devido às consideráveis poupanças na fatura elétrica (≈ 5000 €/ano) e ao relativamente baixo investimento inicial ($I_0 = 37\ 000$ € e I_0 ≈ 50 000 €). Uma das consequências indiretas da instalação do sistema de ajuste de fluxo luminoso presentes na simulação foi o aumento substancial do consumo de aquecimento da caldeira. Este facto justifica-se devido à diminuição das cargas sensíveis das diversas zonas por consequência da redução da intensidade de iluminação artificial, exigindo maior carga de aquecimento para regular os *setpoints*.

O consumo resultante da instalação conjunta do sistema de ajuste da iluminação e *chiller* de absorção resulta num $IEE \approx 20\ kgep/m^2ano$ para a simulação em ano civil e $IEE \approx 18\ kgep/m^2ano$ para a simulação em ano escolar, ainda assim aquém dos valores limite do RSECE.

A simulação de sistemas de sombreamento e controlo solar nas fachadas Nascente e Poente, complementada com o sistema de ajuste da iluminação artificial, surgiu com o intuito de estudar uma aplicação bastante recorrente nos dias de hoje, através da utilização conjunta das duas estratégias com vista a obter ganhos a nível de arrefecimento e iluminação. Como tal, aliados ao sistema de ajuste da iluminação, foram simulados os cenários para sombreamento e controlo solar apresentados na **Tabela 5.1**, com os respetivos resultados a nível de consumo equivalente. Os preços de referência médios obtidos para sistemas automáticos de tela/rolo corrido datam de 2006, não sendo representativos. Deste modo, a sua análise de viabilidade sairá sempre condicionada pela incerteza. No caso do sombreamento móvel através de estores, os custos de investimento estimados obtidos para a tecnologia, incluindo material e controlo por comando central perfazem um total de $I_0 \approx 53\,000\,€$, face a poupanças anuais na ordem dos $B_n \approx 1800€$, tornando o projeto economicamente inviável para o sombreamento integral das fachadas Nascente e Poente.

No entanto, analisando apenas a hipótese de sombreamento para a fachada Nascente, onde à partida existe um potencial de poupança bastante maior devido à sua orientação solar, conseguem-se obter custos de investimento bastante inferiores devido à menor área de envidraçado. As poupanças em arrefecimento, ainda que menores do que o conjunto Nascente/Poente, estão na ordem dos 1300 €/ano, o que associado a um investimento inicial de $I_0 \approx 16\,000€$, prevê um retorno do investimento a rondar os 12/ 13 anos.

Tabela 5.1 - Estratégias de sombreamento para as fachadas Nascente e Poente e respetivo Índice de Eficiência Energética.

Nascente / Poente	Vidro avançado de controlo solar	Telas/Rolos móveis	Estores de lamelas orientáveis
Vidro avançado	$IEE \approx 19; IEE^{*}$[99] ≈ 17[100]	$IEE \approx 18; IEE^{*} \approx 17$[101]	$IEE \approx 19; IEE^{*} \approx 17$[102]
Telas/Rolos móveis	-		-
Estores de lamelas orientáveis	-	-	$IEE \approx 18$[103]

[99] IEE^{*} refere-se à simulação para o ano escolar

[100] Envidraçado termo crómico em vidro duplo associado a um revestimento interior de baixa transmissividade para as fachadas Nascente e Poente.

[101] Envidraçado termo crómico em vidro duplo associado a um revestimento interior de baixa transmissividade para a fachada Nascente, juntamente com um sistema de sombreamento móvel automático para a fachada Poente utilizando telas corridas controladas por um horário sazonal.

[102] Envidraçado termo crómico em vidro duplo associado a um revestimento interior de baixa transmissividade para a fachada Nascente, juntamente com um sistema de sombreamento móvel automático para a fachada Poente utilizando lamelas controladas por um horário sazonal.

[103] Sistema de sombreamento móvel automático para as fachadas Nascente e Poente utilizando estores de lamelas orientáveis controladas por um horário sazonal.

Convém destacar que, em termos de estratégia de controlo solar conjunta para fins de redução do consumo em arrefecimento e iluminação, esta é a melhor solução, uma vez que permite reduções no consumo em iluminação de cerca de 45% em relação ao modelo original e de 15% em relação ao sistema de *dimming* isoladamente, sem sombreamento.

Na Tabela 5.2, são descritas as várias medidas de eficiência energética estudadas para o Edifício X e avaliado o seu potencial de aplicabilidade, tendo em conta os critérios técnico-económicos analisados.

Tabela 5.2 - Análise de investimento das várias soluções estudadas.

Tecnologia	Investimento inicial	Poupança anual	Período de Retorno	Potencial de investimento
Ajuste iluminação artificial	Entre 37.000 € e 50.000 €	5.100 €	Entre 8 e 10 anos	Alto
Sistema Solar de Ar Condicionado	Entre 347.000 € e 405.000 €	1.900 €	N/A	Nulo
Vidros avançados de controlo solar	152.888 €	1.314 €	N/A	Nulo
Sombreamento com estores auto orientáveis - Fachadas Nascente e Poente	53.245 €	1.772 €	N/A	Nulo
Sombreamento com estores auto orientáveis - Fachada Nascente	16.145 €	1.304 €	Entre 12 e 13 anos	Médio/ Alto[104]

[104] Se complementado com a solução de *dimming* uma vez que permite ganhos em iluminação

6. Conclusões

Após a simulação do modelo original, constata-se a enorme diferença registada entre consumos de aquecimento e arrefecimento, sendo este último bastante superior. O consumo de aquecimento é bastante reduzido, encontrando-se os espaços interiores com temperaturas superiores aos *setpoints* durante grande parte dos dias no Inverno, sem ser necessário recorrer a climatização.

Esta diferença pode ser resultante de vários fatores inerentes à simulação e/ou às condições reais, nomeadamente:

(i) *Orientação solar do Edifício* – Distribuído longitudinalmente ao longo das fachadas Nascente e Poente. A zona dos gabinetes que recorre a condicionamento térmico durante o Inverno está distribuída ao longo da fachada Nascente, a qual recebe a radiação Solar durante os períodos mais frios do dia (manhã), possuindo janelas de vidro duplo incolor que possibilitam o aquecimento por radiação e minimizam as perdas de calor por condução.

(ii) *Condicionamento térmico* – A zona dos Laboratórios, toda a fachada Poente, não tem condicionamento local durante o Inverno, i.e qualquer necessidade de aquecimento é satisfeita via ventilação recorrendo às UTAN ou via transferência de calor por convecção desde as zonas climatizadas;

(iii) *Isolamento térmico* – Tanto a fachada Nascente como a fachada Poente possuem paredes espessas com bons isolamentos térmicos, com camadas de material isolante, minimizando as perdas de calor.

(iv) *Condições climatéricas* – O edifício localiza-se numa zona relativamente amena durante o Inverno (ausência de temperaturas extremas) e quente durante o Verão;

(v) *Cargas sensíveis* – Os parâmetros incluídos na simulação que referenciam o fator horário das cargas térmicas devido a ocupantes, iluminação e equipamentos elétricos podem estar desfasados da realidade. Sendo as cargas sensíveis simuladas superiores ao que realmente se regista, está-se a restringir as necessidades de aquecimento e a sobre dimensionar as necessidades de arrefecimento;

De facto, o baixo consumo registado em aquecimento ambiente pode ser justificado pelo facto conjunto de existir um bom isolamento da envolvente e as temperaturas externas não serem demasiado baixas, acrescido do facto de as temperaturas de *setpoint* para conforto térmico não serem demasiado altas (20ºC para os gabinetes e 18ºC para as salas) e de o número de zonas

condicionadas para aquecimento ser bastante inferior às de arrefecimento (toda a fachada Poente, zona dos laboratórios).

A emissão de Gases de Efeito de Estufa poderia ser reduzida substancialmente com a implementação do Sistema Solar de Ar Condicionado, pelo facto da fonte de produção ser "limpa". De igual forma, o sistema de ajuste de fluxo luminoso reduz o consumo elétrico das lâmpadas, atuando indiretamente na redução das emissões, se esse consumo provier de fontes fósseis. Esta alternativa apresenta um bom potencial de exploração, numa altura em que os custos de eletricidade tendem a aumentar mais, o que corresponde a um incremento dos benefícios anuais do projeto.

As várias soluções adotadas para o sombreamento manifestaram-se eficientes do ponto de vista de redução do consumo em arrefecimento, sem penalizar de forma equivalente o consumo em iluminação. Essa redução é semelhante nos vários casos, compreendendo-se entre os -13% e -18%, relativamente ao consumo em arrefecimento do projeto original. No entanto, os custos de investimento são bastante diferentes, entre sistemas de sombreamento clássicos motorizados e sistemas avançados de controlo solar com vidros termo crómicos. O elevado investimento inicial nestes últimos inviabiliza completamente a sua instalação.

Face ao exposto e com base na análise técnica e económica, as medidas que revelaram um maior potencial são a instalação do sistema de controlo de fluxo luminoso para as várias zonas e a instalação de sistemas de proteção solar baseados em estores auto orientáveis, apenas para a Fachada Nascente. A implementação conjunta dos dois sistemas como estratégia de controlo solar é uma mais-valia a nível da redução do IEE, permitindo ganhos substanciais no consumo global, nomeadamente através de reduções no consumo em arrefecimento e iluminação.

No que diz respeito a segurança, algumas infraestruturas originais podem comprometer ou pôr em risco a integridade dos equipamentos ou do próprio abastecimento. Concretamente, a distribuição conjunta de água fria e quente num sistema a dois tubos é um método obsoleto cujo próprio *EnergyPlus* não permite modelar. As tubagens estão sujeitas a corrosões ou dilatações devido a constantes mudanças na temperatura do fluido circulante e devem portanto ser periodicamente inspecionadas, com especial relevo para o isolamento térmico.

7. Bibliografia

[1] Alison Williams, Barbara Atkinson, Karina Garbesi PhD1, Erik Page, Francis Rubinstein. “Lighting Controls in Commercial Buildings.” *Leukos - The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America* , 2012: Vol 8 No 3 - Pages 161-180.

[2] Altestore. *4' X 8' AE-Series Solar Thermal Collector.* 2012. http://www.altestore.com/store/Solar-Water-Heaters/Solar-Collectors-and-Mounts/AET-Collectors-Racks-Mounts/4-X-8-AE-Series-Solar-Thermal-Collector/p103/.

[3] Ara, Paulo José Schiavon. “Desempenho de Sistemas de Condicionamento de Ar com utilização de energia solar em edifícios de escritórios.” Relatório do trabalho final de curso - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

[4] Arpan Bakshi, J.Alstan Jakubiec. “A simple cost-benefit estimation for daylighting design and analysis during the design process.” *12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.* Sydney, Australia, 2011. 8.

[5] Bryant, Sean Michael. “Techno-economic feasibility of CHP plants equipped with thermal storage in Ontario, Canada and their conversion to Trigeneration plants using Absorption chillers , pp 29.” 2011.

[6] Buildings Performance Institute Europe (BPIE). *Europe's Buildings by the microscope.* European Union, 2011.

[7] Buildings Performance Institute Europe, Ecofys, Danish Building Research Institute. “Principles for Nearly zero-energy buildings.” 2011.

[8] Caixa Geral de Depósitos. *Site oficial da Caixa Geral de Depósitos.* https://www.cgd.pt/Institucional/Caixa-Carbono-Zero/Projectos/Pages/Central-Solar.aspx (accessed 2012 йил Junho).

[9] Center for the Built Environment. “High Performance Facades - Design Strategies and Applications in North America and Northern Europe.” California, USA, 2011.

[10] Clanton & Associates. “Wireless Lighting Control - A Life Cycle Cost Evaluation of Multiple Lighting Control Strategies.”

[11] Dekka. *Dekka Supply AET No. AE-32 Solar Thermal Collector, Glazed Flat-plate.* 2012. http://dekkasupply.com/stores/aet/ae-32.html.

[12] Direcção Geral de Energia e Geologia, Instituto Nacional de Estatística. *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010.* Instituto Nacional de Estatística, I.P.; Direcção Geral de Energia e Geologia, 2010.

[13] DOE-USA. *EnergyPlus guide - InputOutput Reference.*

[14] EnergyPlus - US Department of Energy. “The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.” 2009.

[15] *EnergyPlus* Energy Simulation software - *Weather data.* 2012. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal.

[16] Eng. Rodrigues Gomes & Associados - Consultores de Instalações Especiais LDA. “Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade Nova de Lisboa - Projecto de Execução Sistemas Térmicos e de Tratamento Ambiental .” Projecto de Execução.

[17] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. *Tarifas e preços para a energia eléctrica e outros serviços em 2012 e parâmetros para o período de regulação 2012-2014.* Arquivo de informação publica regulatória, ERSE, 2011.

[18] Executive Agency for Competitiveness and Innovation of the European Commission (EACI), Intelligent Energy - Europe Programme (IEE). *Renewable energy in buildings - Project Report.* EACL, 2009.

[19] Ferreira, Maria Amaro Matoso Aguiar. "A eficiência energética na reabilitação dos edifícios." Relatório de trabalho final de curso - FCT UNL, 2009.

[20] Grossman, G. *Solar-powered systems for cooling, dehumidificationand air conditioning.* 2002.

[21] INETI - Hélder Gonçalves e João Mariz Graça. *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal.* DGGE.

[22] International Energy Agency - Energy Conservation in Buildings and Community Systems . *Guidebook on Energy efficient electric lighting for buildings.* Liisa Halonen, Eino Tetri & Pramod Bhusal, 2010.

[23] International Energy Agency - Solar Heating & Cooling Programme. *IEA SHC Task 38 Solar Air-Conditioning and Refrigeration Solar Cooling Position Paper.* IEA, 2011.

[24] International Energy Agency Renewable Energy Division. *Technology Roadmap - Solar Heating and Cooling.* International Energy Agency, 2012.

[25] International Energy Agency. *Technology Roadmap - Energy Efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment.* IEA, 2011.

[26] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2011.* IEA, 2011.

[27] J. Darkwa*, S. Fraser, D.H.C. Chow. "Theoretical and practical analysis of an integrated solar hot water-powered." *elsevier*, 2012: 8.

[28] J.P.Praene, D.Morau, F.Lucas, F.Garde, and H.Boyer. "Simulation of a Solar Absorption Cooling System."

[29] Lima, Bruno. "Projecto de um projecto de ar condicionado do Museu Marítimo e Regional do Ílhavo." Relatório final do trabalho final de curso - Instituto Superior Técnico, 2002.

[30] DOE-USA. *EnergyPlus guide - Engineering Reference.* 2009

[31] M. Mazloumi *, M. Naghashzadegan, K. Javaherdeh. "Simulation of solar lithium bromide–water absorption cooling system." *elsevier*, 2008: 13.

[32] Mendes, Gonçalo F. Ferreira. "Climatização de um Edifício de escritórios com zona comercial." Projecto de Termodinâmica Aplicada - Instituto Superior Técnico, 2001.

[33] Roriz, Luis. *Climatização - Concepção, Instalação e Condução de Sistemas.* 2ª. Orion, 2007.

[34] Regulamento dos Serviços Energéticos e Climatização de Edifícios." *Diário da Republica.*

[35] Santos, Sara Diana Pinheiro dos. "Análise do uso da energia na FCT-UNL (edifícios II, VII, VIII, IX e X) e estudo dos comportamentos relativos ao uso da energia." Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil Gestão e Sistemas Ambientais, 2010.

[36] SolarDirect. *SolarDirect AET AE Collector - Active Solar Water Heater Panel with Mounting Hardware - One 4 x 8 Collector.* http://shop.solardirect.com/product_info.php?products_id=871.

[37] SolarTown catalogue. *SolarTown AET Solar Hot Water Heater AE-32 Solar Collector .* 2012. http://www.solartown.com/store/product/aet-solar-hot-water-heater-ae-32-solar-collector/.

[38] Susanne Lindmark - KTH - Royal Institute of technology Dept. of Chemical Engineering and Technology. *The Role of Absorption Cooling for Reaching Sustainable Energy Systems.* Licenciate Thesis, Stockholm Sweden: Universitetsservice US AB, 2005.

[39] U.S. Department of Energy - National Renewable Energy Laboratory . *EnergyPlus Lecture 22: Primary System Loops in EnergyPlus.* 2003.

[40] Lawrence Berkeley National Laboratory - Environmental Technologies Division - Building Technologies Department. “Preliminary evaluation of the energy saving potentials of exterior operable window shading systems for residential buildings in California.” Evaluation Report, California, 2006.

[41] Lawrence Berkely National Laboratory. “Integrating Automated Shading and Smart Glazings with Daylight Controls.” International Symposium on Daylighting Buildings (IEA SHC TASK 31).

[42] Energy Research Group, University College Dublin. “Shading Systems - Solar shading for the European climates.” ENERGIE under the European Union Fifth's Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration.

[43] U.S Department of Energy, Pleotint. “Sunlight Responsive Thermochromic Window System.” Final Report, USA, 2006.

[44] Palhinha, Milene Silva de Jesus. “Sistemas de Sombreamento em Arquitectura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento.” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Arquitectura do Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2009.

[45] PPG Residential Glass Products . *Solarban60 for Solar control low-E glass - Features Benefits/Comparison.* October de 2009.

[46] Canadian Centre for Housing Technologies. “Guidelines for effective residential solar shading devices.” Indoor Environment Research Programme, Canada, 2010..

[47] Nanomarkets available on www.nanomarkets.net (Fevereiro 2013), *Next-Generation on Smart Windows: Materials and Markets:2011.* 2012.

[48] CRUZFER, www.cruzfer.pt (Fevereiro 2013), Estores exteriores orientáveis "WAREMA-CRUZFER"

[49] CRUZFER, www.cruzfer.pt (Fevereiro 2013), Central climatronic "WAREMA-CRUZFER"

8. Anexos

ANEXO I – RSECE

(i) Valores mínimos para o caudal de ar novo

ANEXO VI

Caudais mínimos de ar novo

Tipo de actividade		Caudais mínimos de ar novo	
		[m³/(h.ocupante)]	[m³/(h.m²)]
Residencial	Salas de estar e quartos	30	
Comercial	Salas de espera	30	
	Lojas de comércio		5
	Áreas de armazenamento		5
	Vestiários		10
	Supermercados	30	5
Serviços de refeições	Salas de refeições	35	
	Cafetarias	35	35
	Bares, salas de *cocktail*	35	35
	Sala de preparação de refeições	30	
Empreendimentos turísticos	Quartos/suites	30	
	Corredores/átrios		5
Entretenimento	Corredores/átrios		5
	Auditório	30	
	Zona do palco, estúdios	30	
	Café/foyer	35	35
	Piscinas		10
	Ginásio	35	
Serviços	Gabinetes	35	5
	Salas de conferências	35	20
	Salas de assembleia	30	20
	Salas de desenho	30	
	Consultórios médicos	35	
	Salas de recepção	30	15
	Salas de computador	30	
	Elevadores		15
Escolas	Salas de aula	30	
	Laboratórios	35	
	Auditórios	30	
	Bibliotecas	30	
	Bares	35	
Hospitais	Quartos	45	
	Áreas de recuperação	30	
	Áreas de terapia	30	

(i) Valores máximos para o Índice de Eficiência Energética

Tipos de actividade	Tipologia do edifício	IEE (kgep/m².ano)
	Bingos e clubes sociais	45
	Clubes desportivos com piscina	35
	Clubes desportivos sem piscina	25
Serviços	Escritórios	40
	Sedes de bancos e seguradoras	70
	Filiais de bancos e seguradoras	60
	Comunicações	40
	Bibliotecas	20
	Museus e galerias	10
	Tribunais	10
	Estabelecimentos prisionais	20
Escolas	Todas	15
Hospitais	Estabelecimentos de saúde com internamento	40
	Estabelecimentos de saúde sem internamento	40

De acordo com o Anexo IV do RSECE, os caudais mínimos de ar novo a aplicar para as diversas zonas podem ser definidos em função da área da respectiva zona ou do número de ocupantes (que pode ser variável).

Tendo em conta a média de ocupantes por zona, definiram-se os limites mínimos para os caudais de ar novo. O projecto AVAC do edifício apresenta valores de caudal de ar novo superiores aos mínimos estipulados, conforme se identifica na tabela.

Tabela 8.1 - Imposições do RSECE e parâmetros da simulação para QAI

Zona\ Caudais	Mín (m3/h.ocupante)	Mín (m3.h)	Real (m3.h)
Gabinetes	30	**60**	**90**
Laboratórios	35	**840**	**900-1050-1200**
Salas de Aula	30	**600**	**950-1400-1800**
Biblioteca	30	**450**	**480**

O *EnergyPlus* permite a definição dos caudais de ar novo em termos de ocupantes, área, ou em valor absoluto (por zona).

Field	Units	Obj57	Obj58	Obj59	Obj60
Zone Name		Lab1.8_Tele	Lab1.9_Accionamei	Sala1.10	Secretaria
Zone Cooling Design Supply Air Temperature	C	18	18	18	18
Zone Heating Design Supply Air Temperature	C	30	20	20	30
Zone Cooling Design Supply Air Humidity Ratio	kg-H2O/kg-air	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085
Zone Heating Design Supply Air Humidity Ratio	kg-H2O/kg-air	0,008	0,008	0,008	0,008
Outdoor Air Method		Flow/Zone	Flow/Zone	Flow/Zone	Flow/Zone
Outdoor Air Flow per Person	m3/s				
Outdoor Air Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Outdoor Air Flow per Zone	m3/s	0,2916	0,417	0,2666	0,0667
Zone Sizing Factor					
Cooling Design Air Flow Method		DesignDay	DesignDay	DesignDay	DesignDay
Cooling Design Air Flow Rate	m3/s				

Tabela 8.2 - Carga horária de ocupação, iluminação e equipamentos eléctricos para estabelecimentos de ensino de acordo com o RSECE

Horário	Ocupação (%)	Iluminação (%)	Equipamentos Eléctricos (%)
00h00-1h00	0	0	0
1h00-2h00	0	0	0
2h00-3h00	0	0	0
3h00-4h00	0	0	0
4h00-5h00	0	0	0
5h00-6h00	0	0	0
6h00-7h00	0	0	0
7h00-8h00	5	15	15
8h00-9h00	80	85	85
9h00-10h00	85	90	90
10h00-11h00	100	100	100
11h00-12h00	95	95	95
12h00-13h00	45	45	45
13h00-14h00	70	60	60
14h00-15h00	95	100	100
15h00-16h00	100	95	95
16h00-17h00	90	80	80
17h00-18h00	50	40	40
18h00-19h00	10	10	10
19h00-20h00	10	10	10
20h00-21h00	10	10	10
21h00-22h00	10	10	10
22h00-23h00	10	10	10
23h00-00h00	10	10	10

ANEXO II – *Layout* do *Edifício X em Google SketchUp*

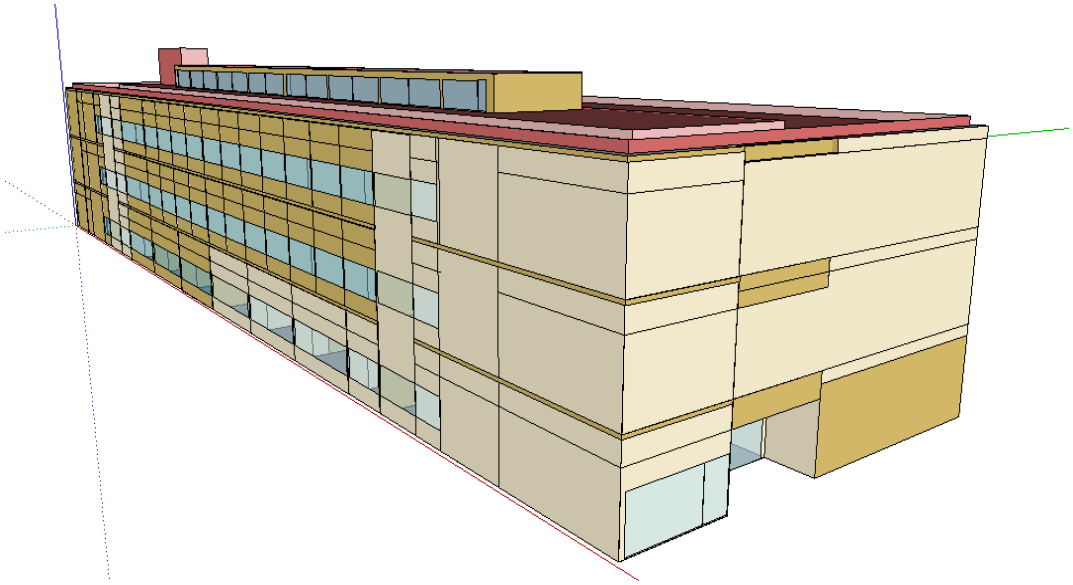


Figura 8.1 - Vista das fachadas Norte e Nascente do edifício

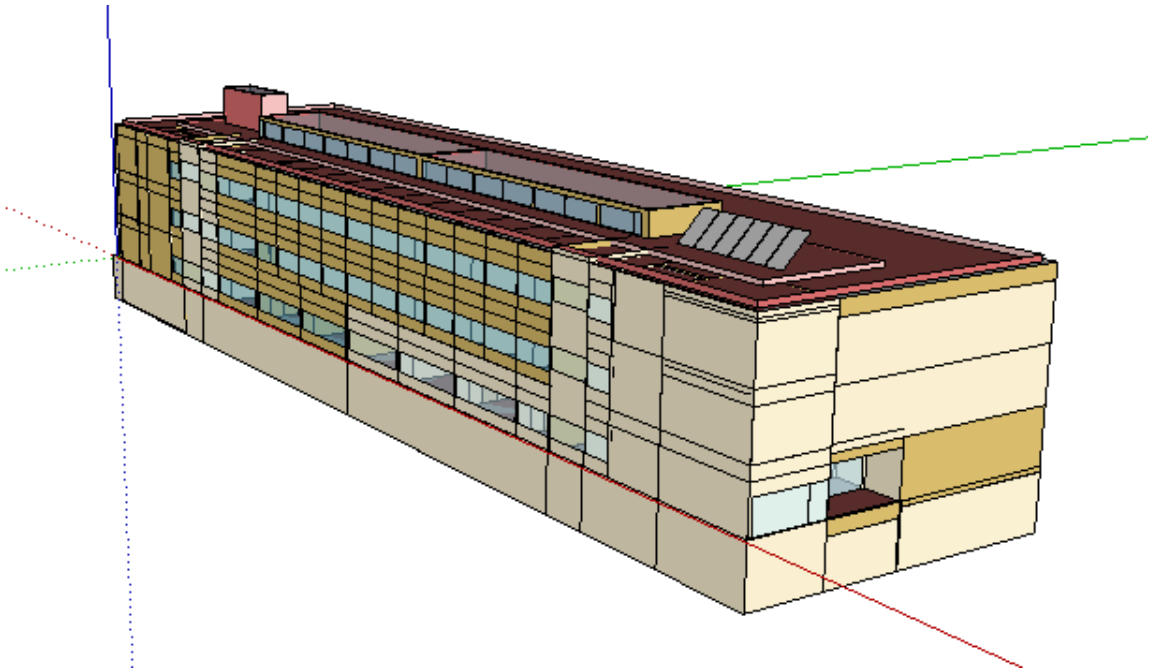


Figura 8.2 - Vista (2) das fachadas Norte e Nascente do edifício

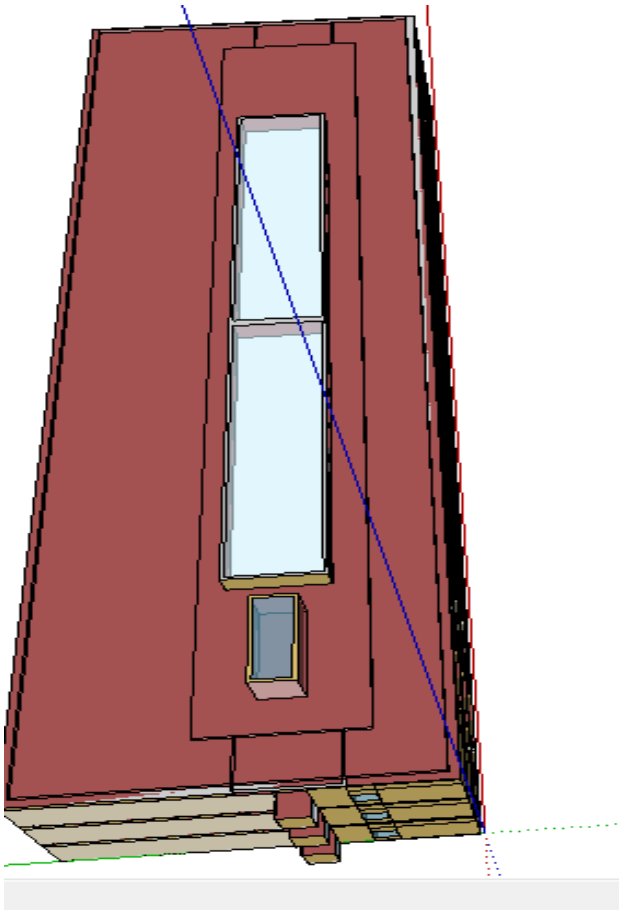


Figura 8.3 - Vista superior da cobertura do edifício

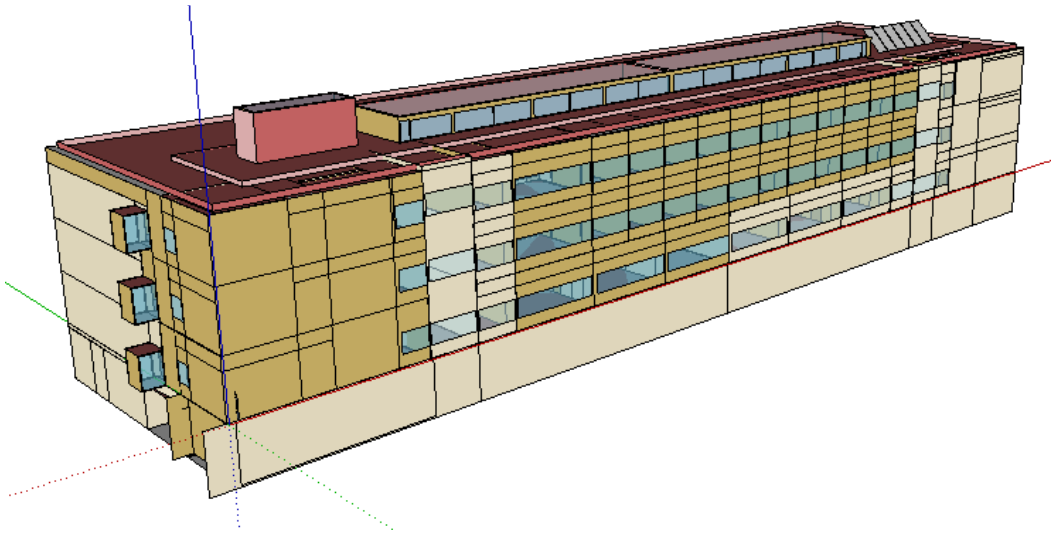


Figura 8.4 - Vista das fachadas Sul e Nascente do edifício

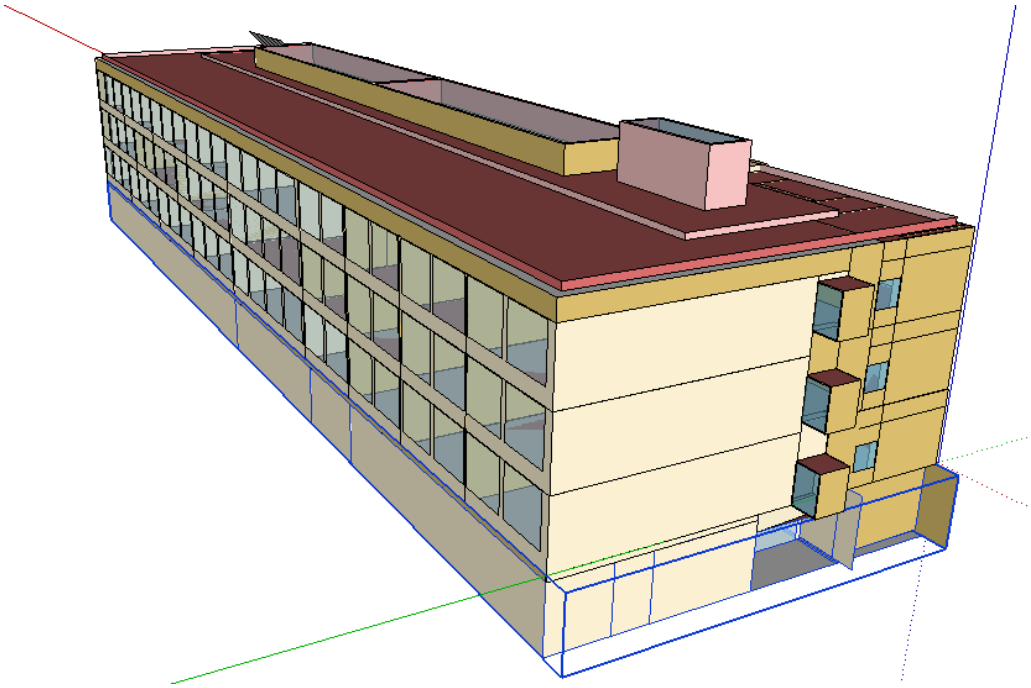
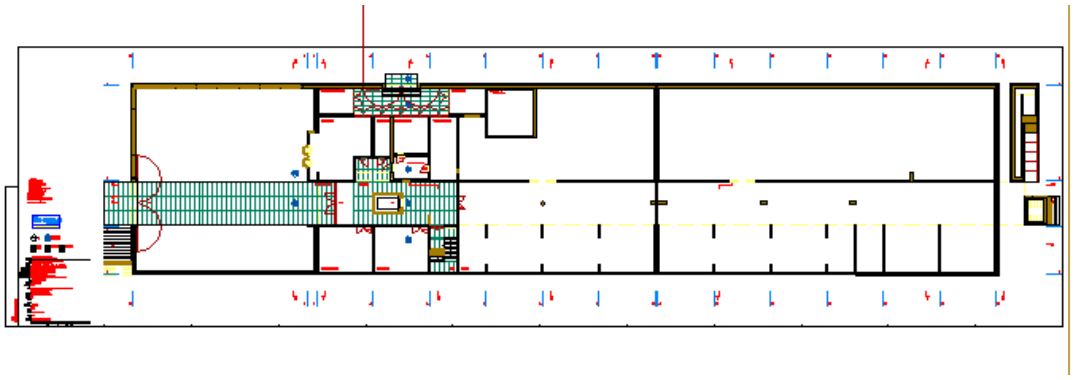


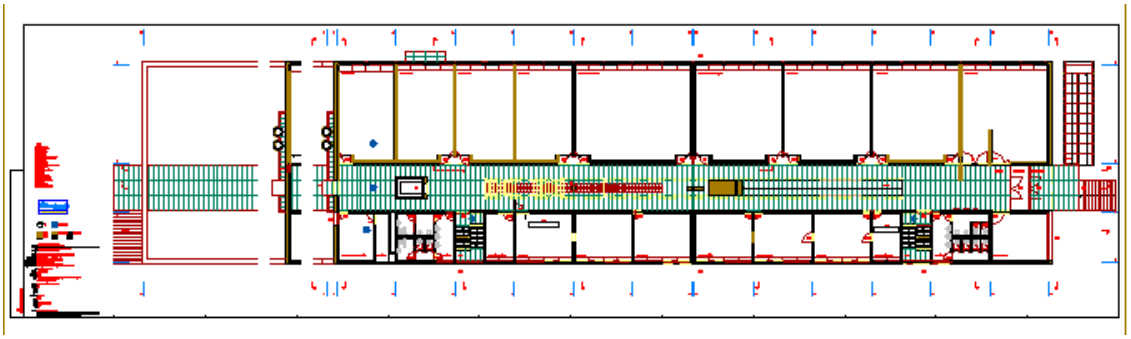
Figura 8.5 - Vista das fachadas Sul e Poente do edifício

Anexo III – Ficheiros AutoCAD

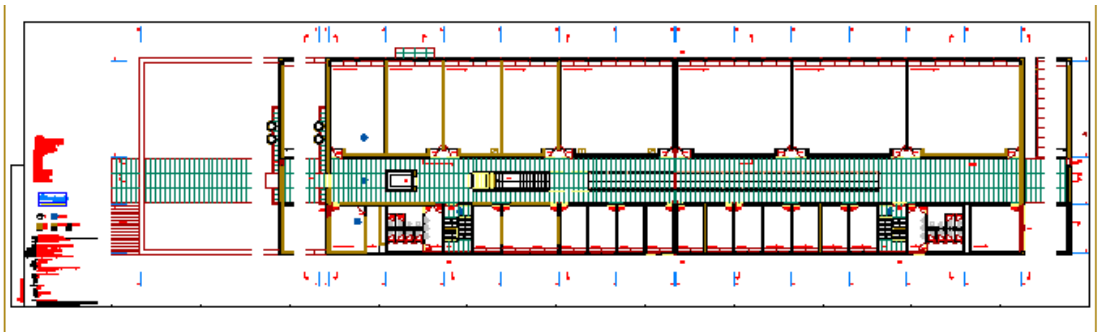
(i) Planta da cave



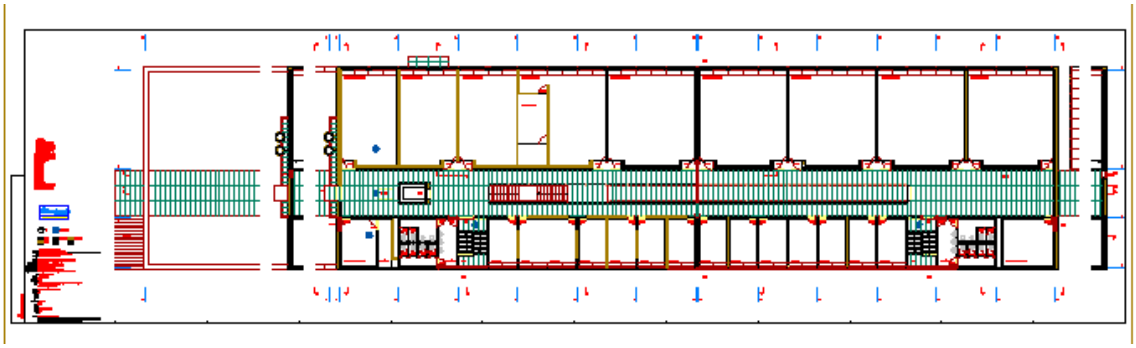
(ii) Planta Piso 0



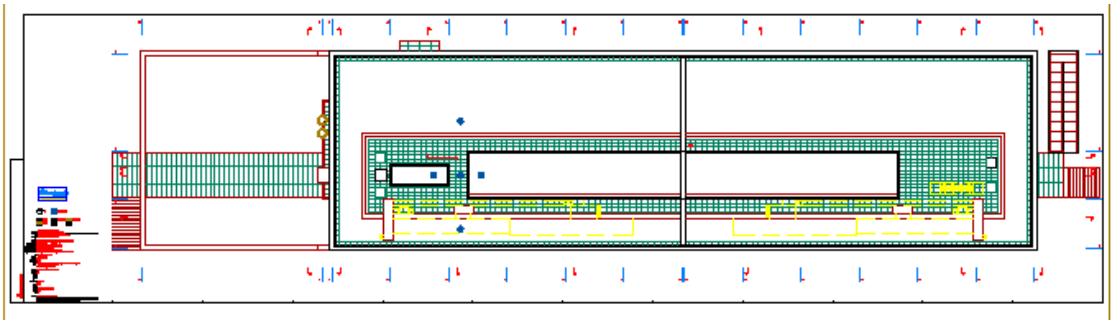
(iii) Planta Piso 1



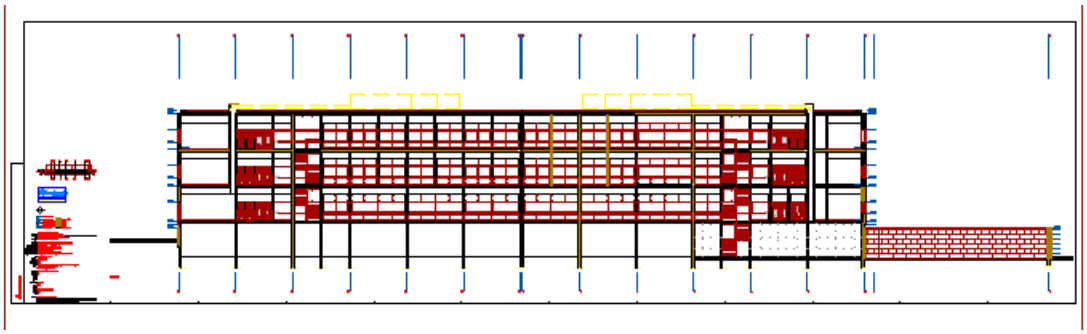
(iv) Planta Piso 2



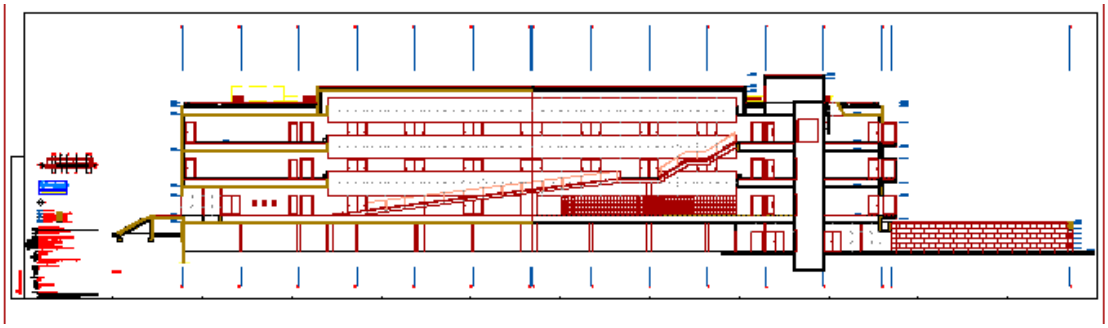
(v) Planta cobertura



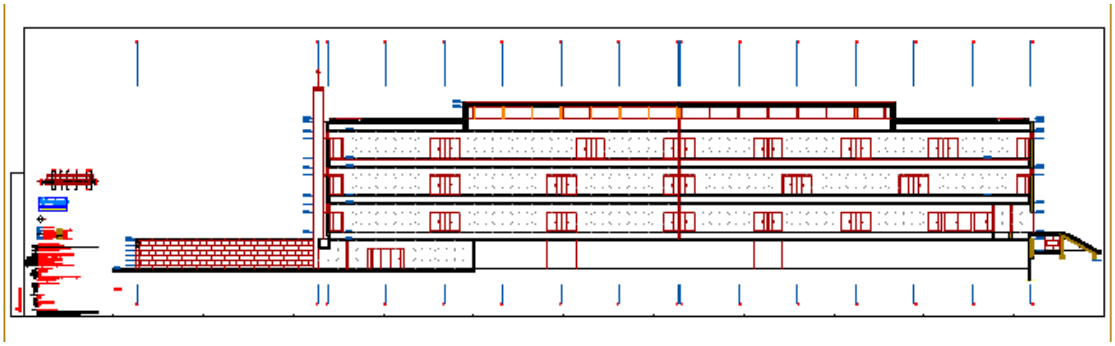
(vi) Corte longitudinal 1



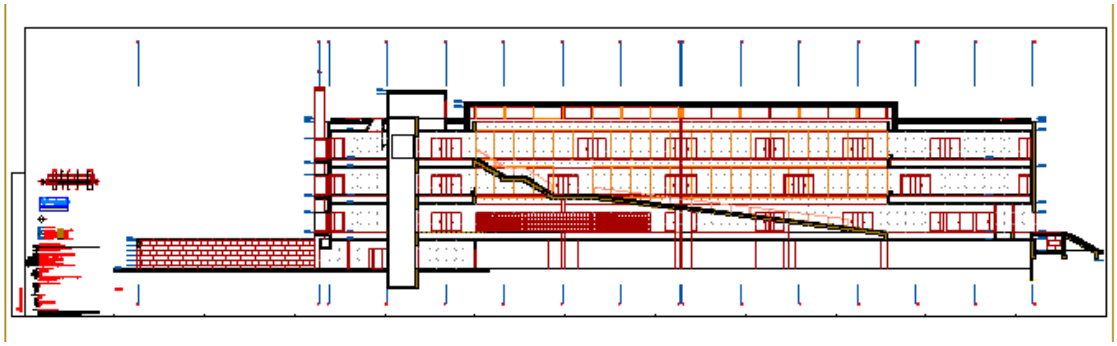
(vii) Corte longitudinal 2



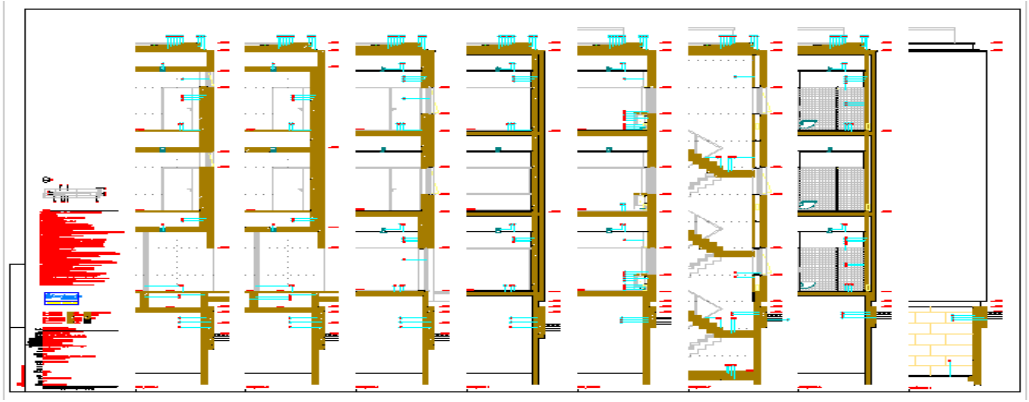
(viii) Corte longitudinal 3



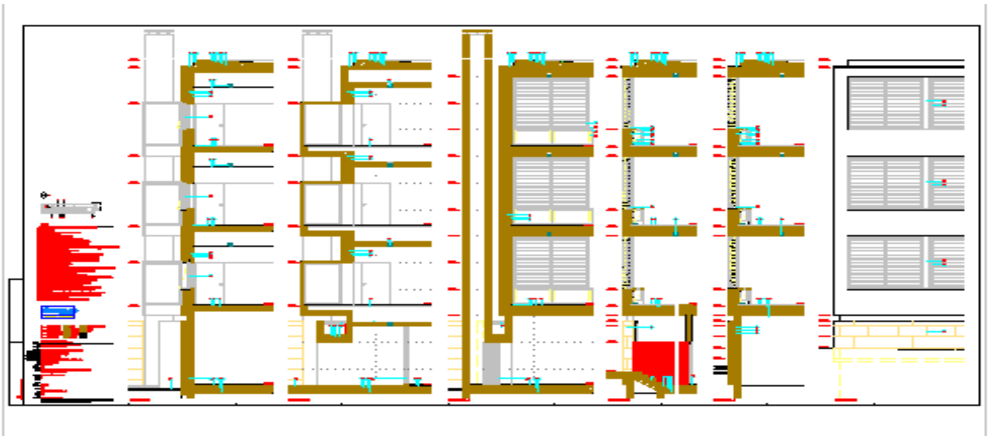
(ix) Corte longitudinal 4



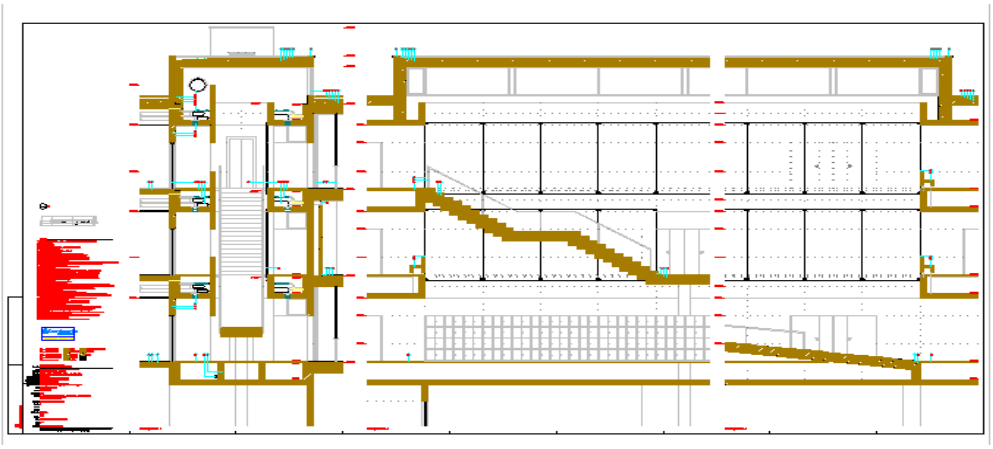
(i) Corte fachadas Norte e Nascente



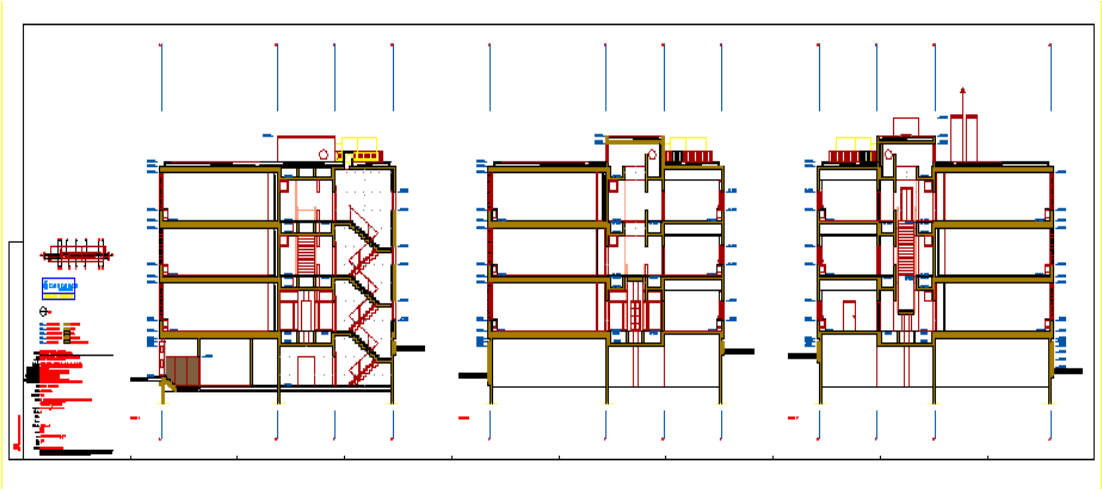
(i) Corte fachadas Sul e Poente



(i) Corte Interno zona central do edifício



(i) Fachadas transversais



Anexo IV – *Outputs* da simulação

(i) Condições de projecto para a localização do Edifício de acordo com os dados do INETI

Report: **ClimaticDataSummary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2012-06-25 20:19:09**

SizingPeriod:DesignDay

	Maximum Dry Bulb [C]	Daily Temperature Range [C]	Humidity Value	Humidity Type	Wind Speed [m/s]	Wind Direction
LISBON_PORTUGAL HEATING 99% CONDITIONS	17.30	10.60	-2.90	WETBULB	4.90	0.00
LISBON_PORTUGAL COOLING 1% CONDITIONS DB=>MWB	36.00	22.60	20.50	WETBULB	5.70	330.00

(ii) Energia consumida na simulação anual (projeto original)

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m2]
Total Site Energy	1126.87	198.73	389.73
Net Site Energy	1126.87	198.73	389.73
Total Source Energy	3974.34	700.91	1374.53
Net Source Energy	3974.34	700.91	1374.53

(iii) Áreas e parâmetros da envolvente do Edifício

ENVELOPE

Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m2]	3645.31	1108.12	338.84	1743.69	454.66
Window Opening Area [m2]	749.26	71.46	11.74	652.53	13.53
Window-Wall Ratio [%]	20.55	6.45	3.46	37.42	2.98

Skylight-Roof Ratio

	Total
Gross Roof Area [m2]	2479.15
Skylight Area [m2]	10.44
Skylight-Roof Ratio [%]	0.42

(iv) Potências e caudais dimensionadas pelo *software* para bombas e equipamentos de produção

Pumps

	Type	Control	Head [pa]	Power [W]	Motor Efficiency [W/W]
CHW CIRC PUMP	Pump:VariableSpeed	INTERMITTENT	1000000.00	28341.09	0.90
HW CIRC PUMP	Pump:VariableSpeed	INTERMITTENT	1000000.00	24770.48	0.90

PlantLoop

	Maximum Loop Flow Rate [m3/s]	Plant Loop Volume [m3]
CHILLED WATER LOOP	0.019895	22.38
HOT WATER LOOP	0.017389	19.56

Chiller:ConstantCOP

	Nominal Capacity [W]	Design Chilled Water Flow Rate [m3/s]
CENTRAL CHILLER	415814.85	0.019895

Boiler:HotWater

	Nominal Capacity [W]	Design Water Flow Rate [m3/s]
CENTRAL BOILER	363427.63	0.017389

(v) Potências dimensionadas pelo software para arrefecimento e aquecimento das UTAN

System Design Air Flow Rates

	Calculated cooling [m3/s]	User cooling [m3/s]	Calculated heating [m3/s]	User heating [m3/s]
AIR LOOP 2	4.71	4.71	4.54	4.54
AIR LOOP 1	4.63	4.63	4.03	4.03

(vi) Potências dimensionadas pelo *software* para bombas do sistema SSAC e distribuição de água arrefecida

Bomba	Caudal nominal (m^3/s)	Potência nominal (kW)
Bomba de circuito arrefecimento	0,027078 m^3/s	38,6 kW
Bomba do circuito distribuição CST	0,003376 m^3/s	0,9 kW
Bomba do tanque de aquecimento (gerador)	0,019211 m^3/s	5,1 kW
Bomba torre de arrefecimento	0,0103 m^3/s	14,7 kW

Anexo V – Catálogos e referências

(i) Preços de referência para o sistema de *dimming* e controlador usados no cenário 2 (*http://www.meanscostworks.com)*

Line Number	Description	Unit	Crew	Daily Output	Labor Hours	Bare Material	Bare Labor	Bare Equipment	Bare Total	Total
260936130010	MANUAL MODULAR DIMMI...									
260936132000	Daylight dimming cont...	Ea.	1 Elec	2.00	4.000	305.00	182.00		487.00	

266113 Lighting Accessories — Lines 1 - 10 of 10

Line Number	Description	Unit	Crew	Daily Output	Labor Hours	Bare Material	Bare Labor	Bare Equipment	Bare Total	Total O&P
266113100010	ENERGY SAVING LIGHTING DEVICES									
266113100100	Occupancy sensors infrared, ceiling...	Ea.	1 Elec	7.00	1.143	98.00	52.00		150.00	185.50
266113100150	Automatic wall switches	Ea.	1 Elec	24.00	0.333	60.00	15.20		75.20	88.50
266113100200	Remote power pack	Ea.	1 Elec	10.00	0.800	27.00	36.50		63.50	84.00
266113100250	Photoelectric control, S.P.S.T. 120 V	Ea.	1 Elec	8.00	1.000	14.10	45.50		59.60	83.50
266113100300	S.P.S.T. 208 V/277 V	Ea.	1 Elec	8.00	1.000	17.90	45.50		63.40	87.70
266113100350	D.P.S.T. 120 V	Ea.	1 Elec	6.00	1.333	143.00	60.50		203.50	247.50
266113100400	D.P.S.T. 208 V/277 V	Ea.	1 Elec	6.00	1.333	147.00	60.50		207.50	252.50
266113100450	S.P.D.T. 208 V/277 V	Ea.	1 Elec	6.00	1.333	175.00	60.50		235.50	283.50
266113100460	Daylight level sensor, ceiling mtd, au...	Ea.	1 Elec	8.00	1.000	138.00	45.50		183.50	219.00

(ii) Catálogo do sistema de estores com lamelas horizontais controláveis “WAREMA-CRUZFER” (www.cruzfer.pt)

CRUZFER

warema

ESTORES EXTERIORES ORIENTÁVEIS "WAREMA - CRUZFER"

Características Principais

Caixa do mecanismo - Em perfil de alumínio extrudido, 59 mm de largura, 51 mm de altura e 1,5 mm de espessura. A transmissão de movimento é feita através de um varão quadrado em aço galvanizado, autolubrificante e livre de manutenção.
Lamelas - Em alumínio lacado, de 60, 80 ou 100 mm de largura, com 0,45 mm de espessura, polidas para uma melhor reflexão e limpeza. Todos os furos feitos nas lamelas para da passagem fita de sustentação, possuem protecção em plástico preto, permitindo assim uma maior resistência ao desgaste dos materiais.
Fitas de orientação - Executadas em Trevira de cor preta, segura as lamelas do lado de cima e de baixo e permite a orientação das mesmas, resistente aos agentes atmosféricos e á prova de ácidos.
Fitas de sustentação - Em cor preta, resistente aos agentes atmosféricos e aos raios ultra-violetas, com uma largura de 6 mm e com uma capacidade de tracção de 1000 N.
Guias laterais
Calha de alumínio (A6) - Em perfil de alumínio, com uma profundidade de 25 mm, garantem um deslizar perfeito dos estabilizadores laterais. Nas calhas laterais estão acoplados perfis plásticos pretos, que funcionam como amortecedores, permitindo um deslizamento perfeito e silencioso das lamelas. Para este modelo cada lamela possui um estabilizador lateral em poliamida, reforçado em 3 pontos por prensagem a quente.
Cabos de aço (A2) - Cabos em aço de 3,3 mm de diâmetro, revestidos a poliamida transparente ou preta. O cabo é fixo na caixa do mecanismo e na parte inferior através de distanciadores em alumínio que permitem uma regulação da tensão dos cabos.
Comando manual - Manual por manivela articulada, em alumínio anodizado á cor natural, ligada a uma articulação de rodas dentadas cônicas, através de um varão sextavado.
Comando eléctrico - Motor central, embutido na caixa do mecanismo, não necessita de manutenção. Protecção tipo IP 44. A força do motor é transmitida a duas saídas de barra e transita de modo uniforme ao longo do veio, permitindo subir, baixar e orientar o estore através do comando de um interruptor que pode ser embutido ou saliente. Comando central com sensor de vento, luminosidade, etc, como opção (pág. 105).

Tabela de dimensões

Tipo de estores	Largura mínima mm	Largura máxima mm	Altura máxima mm	Área Máxima M2	Largura de lamela mm	Peso Kg / m2	Tipo de guia	Tipo de comando
C 80 / 60 A2	450	5000 *	4000	12	80 / 60	2,8 / 2,7	Cabos	Manivela
E 80 / 60 A2	600	5000 *	4000	20	80 / 60	3,1 / 3,0	Cabos	Interruptor
C 80 / 60 A6	450	5000	5000	12	80 / 60	2,8 / 2,7	Calha	Manivela
E 80 / 60 A6	600	5000	5000	25	80 / 60	3,1 / 3,0	Calha	Interruptor
C 60/80/100 AF	450	5000 *	4000	13	60/80/100	1,3/2,4/2,5	Cabos	Manivela
E 60/80/100 AF	600	5000 *	4000	20	60/80/100	2,5/2,7/2,7	Cabos	Interruptor

Nota* : na aplicação do estore A2 ou AF, ter em conta que até 3000mm de largura 2 cabos, a partir de 3000mm de largura 3 cabos, a partir de 4000mm de largura 4 cabos e de 5000mm de largura 5 cabos.
Na aplicação do estore AF A6, ter em conta que a partir de 2400mm de largura é necessário colocar cabos adicionais.
* Para calculo de dimensão de caixa de recolha, consultar pag. 23

10 www.cruzfer.pt

CRUZFER

warema

ESTORES EXTERIORES ORIENTÁVEIS "WAREMA - CRUZFER"

Características Principais

Caixa do mecanismo - Em perfil de alumínio extrudido, 59 mm de largura, 51 mm de altura e 1,5 mm de espessura. A transmissão de movimento é feita através de um varão quadrado em aço galvanizado, autolubrificante e livre de manutenção.
Lamelas - Em alumínio lacado, de 60, 80 ou 100 mm de largura, com 0,45 mm de espessura, polidas para uma melhor reflexão e limpeza. Todos os furos feitos nas lamelas para da passagem fita de sustentação, possuem protecção em plástico preto, permitindo assim uma maior resistência ao desgaste dos materiais.
Fitas de orientação - Executadas em Trevira de cor preta, segura as lamelas do lado de cima e de baixo e permite a orientação das mesmas, resistente aos agentes atmosféricos e á prova de ácidos.
Fitas de sustentação - Em cor preta, resistente aos agentes atmosféricos e aos raios ultra-violetas, com uma largura de 6 mm e com uma capacidade de tracção de 1000 N.
Guias laterais
Calha de alumínio (A6) - Em perfil de alumínio, com uma profundidade de 25 mm, garantem um deslizar perfeito dos estabilizadores laterais. Nas calhas laterais estão acoplados perfis plásticos pretos, que funcionam como amortecedores, permitindo um deslizamento perfeito e silencioso das lamelas. Para este modelo cada lamela possui um estabilizador lateral em poliamida, reforçado em 3 pontos por prensagem a quente.
Cabos de aço (A2) - Cabos em aço de 3,3 mm de diâmetro, revestidos a poliamida transparente ou preta. O cabo é fixo na caixa do mecanismo e na parte inferior através de distanciadores em alumínio que permitem uma regulação da tensão dos cabos.
Comando manual - Manual por manivela articulada, em alumínio anodizado á cor natural, ligada a uma articulação de rodas dentadas cónicas, através de um varão sextavado.
Comando eléctrico - Motor central, embutido na caixa do mecanismo, não necessita de manutenção. Protecção tipo IP 44. A força do motor é transmitida a duas saídas de barra e transita de modo uniforme ao longo do veio, permitindo subir, baixar e orientar o estore através do comando de um interruptor que pode ser embutido ou saliente. Comando central com sensor de vento, luminosidade, etc, como opção (pág. 105).

Tabela de dimensões

Tipo de estores	Largura mínima mm	Largura máxima mm	Altura máxima mm	Área Máxima M2	Largura de lamela mm	Peso Kg / m2	Tipo de guia	Tipo de comando
C 80 / 60 A2	450	5000 *	4000	12	80 / 60	2,8 / 2,7	Cabos	Manivela
E 80 / 60 A2	600	5000 *	4000	20	80 / 60	3,1 / 3,0	Cabos	Interruptor
C 80 / 60 A6	450	5000	5000	12	80 / 60	2,8 / 2,7	Calha	Manivela
E 80 / 60 A6	600	5000	5000	25	80 / 60	3,1 / 3,0	Calha	Interruptor
C 60/80/100 AF	450	5000 *	4000	13	60/80/100	1,3/2,4/2,5	Cabos	Manivela
E 60/80/100 AF	600	5000 *	4000	20	60/80/100	2,5/2,7/2,7	Cabos	Interruptor

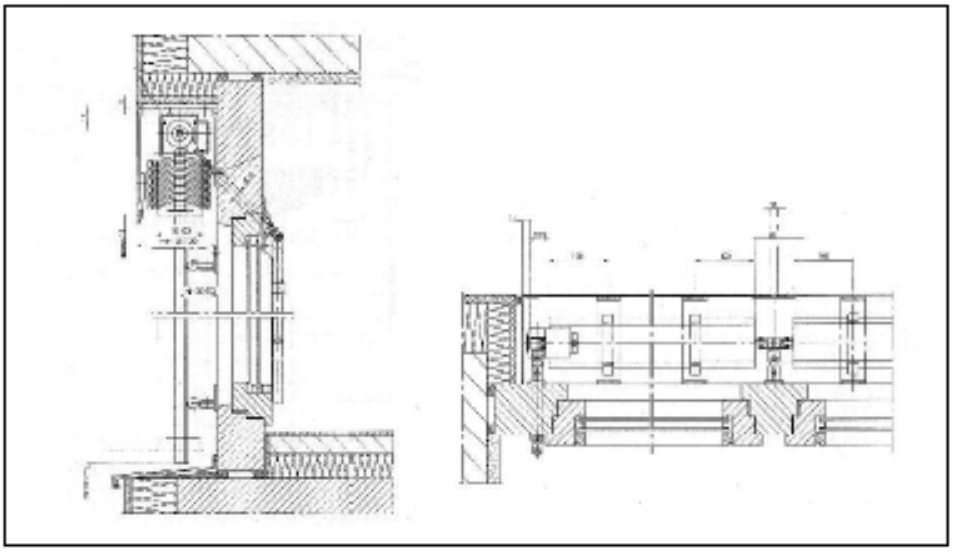
Nota* : na aplicação do estore A2 ou AF, ter em conta que até 3000mm de largura 2 cabos, a partir de 3000mm de largura 3 cabos, a partir de 4000mm de largura 4 cabos e de 5000mm de largura 5 cabos.

CRUZFER

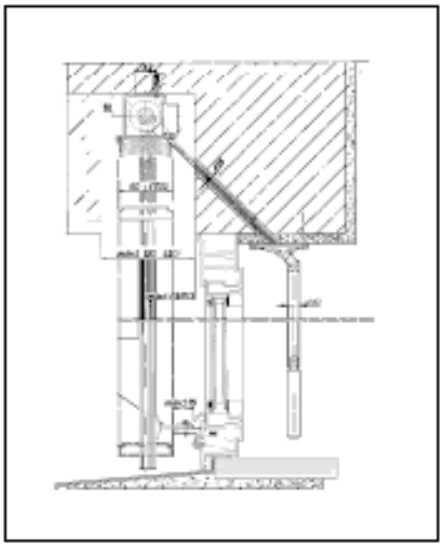
warema

ESTORES EXTERIORES ORIENTÁVEIS "WAREMA - CRUZFER"

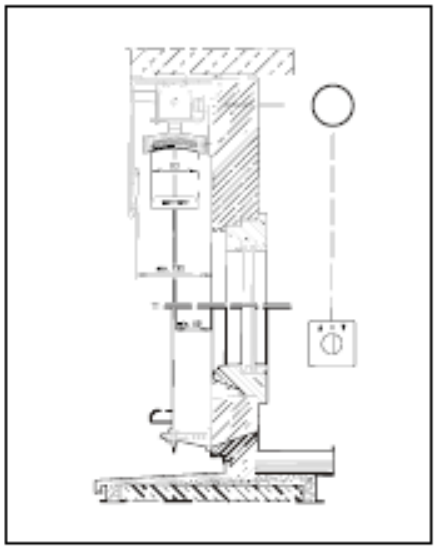
Corte tipo de estore C80A0, comando manual



Corte tipo de estore C80A6



Corte tipo de estore E80AF



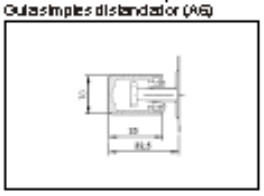
CRUZFER

warema

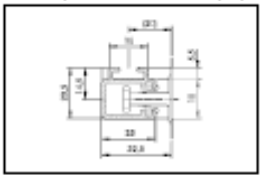
ESTORES EXTERIORES ORIENTÁVEIS "WAREMA - CRUZFER"

Guias laterais / duplas

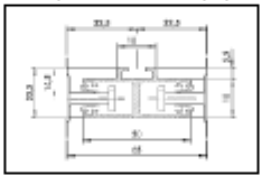
Guia simples distanciador (A6)



Guia simples com distanciador (A6)

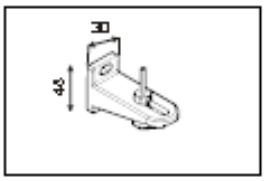


Guia dupla com distanciador (A6)

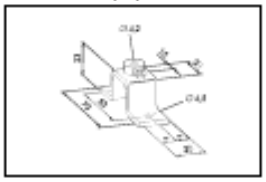


Poleias para cabo

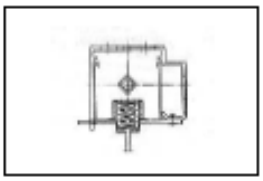
Polea parede / techaria (A2)



Polea s dieira (A2)

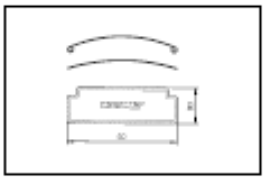


Mida tensora (A2)

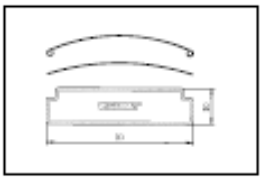


Lamelas

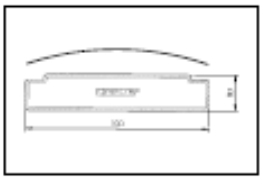
Lamela 60mm



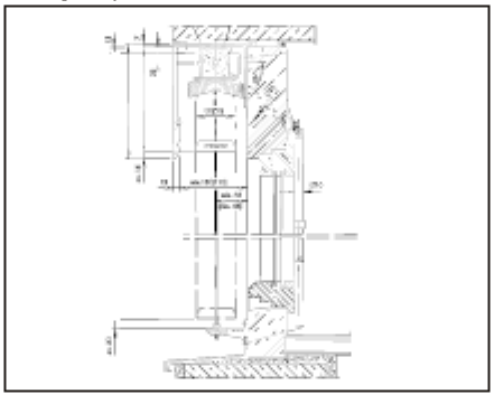
Lamela 80mm



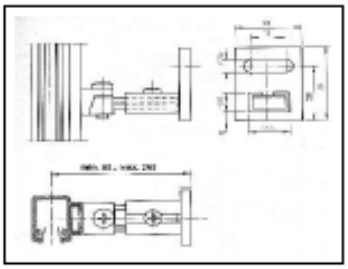
Lamela 100 mm



Montagem tipo



Distanciador (A6)



(iii) Catálogo do sistema de comando central Climatronic “WAREMA-CRUZFER” (www.cruzfer.pt)

CRUZFER

warema

CENTRAL CLIMATRONIC “WAREMA-CRUZFER”

O SEU OÁSIS PESSOAL EM CASA.

A central CLIMATRONIC WAREMA coordena muitas funções e sistemas para poder manter todo o ano um clima constante no interior da sua casa. Para esse efeito a protecção solar, o ar condicionado e o sistema de aquecimento devem trabalhar em conjunto para poder reagir ás influências climatéricas exteriores.

O CLIMATRONIC controla todos os sistemas da sua casa, reduzindo o consumo de energia e proporcionando um clima agradável.
Tem disponível ate 32 canais de controlo, os parâmetros são ajustados e actua mediante as informações reduzidas pelos sensores associados (luminosidade, vento, precipitação, temperatura interior, humidade etc.)

www.cruzfer.pt 109